



Universidad de León



Universidad de Valladolid

MÁSTER DE POSTGRADO EN
INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**APLICACIÓN DE SEÑALES DETERMINISTAS E
IMPULSIVAS EN LOS NUEVOS MÉTODOS DE
MEDICIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A
RUIDO AÉREO EN EDIFICIOS**

Leroy Otto Granados

Dra. María Machimbarrena
Tutora

Daniel de la Prida
Cotutor

Valladolid, Septiembre de 2016

Universidad de Valladolid | Universidad de León
Máster en Ingeniería Acústica y Vibraciones
Trabajo Fin de Máster Curso 2015/16

Título:

“Aplicación de señales deterministas e impulsivas en los nuevos métodos de medición del aislamiento a ruido aéreo en edificios.”

Autor:

Leroy Otto Granados

Tutora:

Dra. María Machimbarrena Gutiérrez
(DSc. Universidad de Valladolid)

VºBº

Cotutor:

Daniel de la Prida Caballero
(MSc. Universidad de Valladolid)

VºBº

Valladolid, Septiembre de 2016

RESUMEN

Se pueden adoptar diferentes tipos de señales de excitación y procedimientos para determinar el nivel de aislamiento a ruido aéreo de un cerramiento en mediciones de acústica de la edificación. A partir de los fundamentos teóricos de la propagación del sonido en espacios cerrados, se realiza una revisión del método clásico de medida según la norma ISO 16283-1, del método de la función de transferencia con un barrido sinusoidal, y de un método alternativo que se basa en la excitación sonora producida por una pistola de fogeo. En un estudio experimental llevado a cabo en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid, se comparan los resultados de la diferencia de niveles de presión sonora entre recintos, medidos con los tres métodos en tres casos de estudio, y se discute la coherencia, la dispersión de las medidas de muestreo y la influencia de las características de la señal de excitación empleada en cada método.

Palabras clave: aislamiento acústico; nuevos métodos; barrido sinusoidal; pistola

ABSTRACT

There are different types of excitation signals and procedures to determine the airborne sound insulation level in building acoustic measurements. From the theoretical foundations of sound propagation in enclosed spaces, it is presented a revision of the classical method of measurement according to ISO 16283-1 standard, the transfer function method with a sine sweep signal, and the alternative method based on measuring the sound excitation produced by a blank gun. An experimental study is conducted at the Higher Technical School of Architecture in Valladolid, and the results of the difference in sound pressure levels measured with three different methods are compared in three case studies. It is discussed the consistency, the dispersion of sampling measures and the influence of the excitation signal characteristics used in each method.

Keywords: sound insulation; new methods; sine sweep signal; gun

RESUMO

No âmbito das medições de acústica de edificações, existem diferentes tipos de sinais de excitação e procedimentos que podem ser adotados na medição do isolamento acústico a ruído aéreo de um fechamento. A partir dos fundamentos teóricos da propagação sonora em espaços fechados, realiza-se uma revisão do método clássico de medição segundo a norma ISO 16283-1, do método da função de transferência com uma varredura senoidal e de um método alternativo que se baseia na excitação sonora produzida por uma pistola de festim. Em um estudo experimental realizado na Escola Técnica Superior de Arquitetura de Valadoli, comparam-se os resultados da diferença de níveis de pressão sonora entre recintos, medidos com os três métodos em três estudos de caso, e discute-se a coerência, a dispersão das medidas de amostragem e a influência das características do sinal de excitação utilizado em cada método.

Palavras-chave: isolamento acústico; novos métodos; varredura senoidal; pistola

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
---	----------

PARTE I : ESTADO DEL ARTE

Revisión teórica de los métodos de medición del aislamiento a ruido aéreo *in situ*

2. EL CAMPO ACÚSTICO EN RECINTOS	5
---	----------

2.1 Campo Acústico Reverberante.....	5
2.2 Campo Acústico Difuso.....	6
2.3 Campo Acústico Modal.....	6
2.4 Tipos de Modos Propios y Distribución Espectral	9
2.5 Excitación del Campo Modal en un Recinto	12
2.6 Muestreo Espacial y Medición de la Señal de Excitación en Ensayos de Aislamiento	13

3. MÉTODO CLÁSICO.....	15
-------------------------------	-----------

3.1 Procedimiento y Requisitos de la Norma ISO 16283-1:2014	15
3.1.1 Campo de aplicación y rango de frecuencias	15
3.1.2 Altavoces y generación del campo acústico.....	15
3.1.3 Micrófonos y obtención de datos	16
3.1.4 Muestreo temporal	18
3.1.5 Distancias mínimas para el muestreo espacial	18
3.1.6 Procedimiento de medición específico a bajas frecuencias.....	18
3.1.7 Corrección por ruido de fondo	20
3.1.8 Cálculo de la diferencia de niveles de presión acústica entre recintos.....	20
3.2 Medición del Tiempo de Reverberación en el Recinto Receptor	21
3.2.1 Método de la fuente interrumpida.....	22
3.2.2 Requisitos de la ISO 3382-2.....	24
3.2.3 Decaimiento modal.....	24
3.2.4 Medición del TR a bajas frecuencias	25

4. MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	27
--	-----------

4.1 Método de la Función de Transferencia en Mediciones de Aislamiento: ISO 18233	27
4.1.1 Generalidades	28
4.1.2 Requisitos del sistema bajo ensayo.....	28
4.2 Determinación de la Respuesta al Impulso del Recinto (RIR)	28
4.3 Tiempo de Reverberación por el Método de Schroeder	30

4.4	Aplicación de Señales Deterministas en la Medición de la Respuesta al Impulso.....	31
4.4.1	MLS (<i>Maximum-Length Sequences</i>)	32
4.4.2	Barrido sinusoidal (<i>Sine sweep</i>).....	33
4.5	Criterios de la ISO 18233 para la Determinación del Nivel de Aislamiento Entre Recintos.....	36
4.5.1	Instrumentación	36
4.5.2	Verificación de la relación señal-ruido efectiva	36
4.5.3	Periodo de la señal de excitación	37
4.5.4	Cálculo de la diferencia de niveles D	38
5.	MÉTODO DE LA SEÑAL IMPULSIVA.....	39
5.1	Características de las Fuentes de Ruido Impulsivo	39
5.1.1	Pistolas de fogeo	39
5.1.2	Chispas de energía eléctrica	42
5.1.3	Globos de látex	42
5.1.4	Señales impulsivas digitales	42
5.2	Ventajas del Disparo de una Pistola de Fuego como Señal de Excitación	43
5.3	Medición y Cálculo del Aislamiento a Ruido Aéreo con una Señal Impulsiva.....	44
 PARTE II : APLICACIÓN DE LOS NUEVOS MÉTODOS		
Comparación entre métodos de medición del aislamiento a ruido aéreo <i>in situ</i>		
6.	DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	47
6.1	Casos de Estudio	47
6.2	Instrumentación y Software de Procesado Utilizado.....	49
6.2.1	Cadena de medida del método clásico	50
6.2.2	Cadena de medida del método de la función de transferencia.....	51
6.2.3	Cadena de medida del método de la señal impulsiva.....	51
6.3	Metodología	52
6.3.1	Método clásico.....	53
6.3.2	Método de la función de transferencia	55
6.3.3	Método de la señal impulsiva.....	58
6.3.4	Tabla resumen de los ensayos realizados	60
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
7.1	Caso de Estudio 1: Diferencia de Niveles D entre Salas de Juntas.....	68
7.2	Caso de Estudio 2: Diferencia de Niveles D entre Aulas	67
7.3	Caso de Estudio 3: Diferencia de Niveles D en el Departamento de Física Aplicada...	70
7.4	Atenuación por Divergencia Geométrica para Cada Tipo de Fuente	72

7.5	Desviación Típica de los Niveles Promedios para Cada Tipo de Señal de Excitación..	75
7.6	Ecualización de la Señal de Ruido Aleatorio en el Método Clásico	79
7.7	Periodo del Barrido Sinusoidal en el Método de la Función de Transferencia.....	83
8.	CONCLUSIONES.....	84
8.1	Futuras Líneas de Investigación	85
ANEXO A:	NIVELES PROMEDIOS POR MÉTODO DE MEDICIÓN.....	87
A.1	Ensayos en las Salas de Juntas	87
A.2	Ensayos en las Aulas	89
A.3	Ensayos en el Departamento de Física Aplicada	91
ANEXO B:	IMÁGENES DE LOS ENSAYOS	93
B.1	Imágenes de las Salas de Juntas	93
B.2	Imágenes de las Aulas	95
B.3	Imágenes del Departamento de Física Aplicada	97
ANEXO C:	ERRORES ASOCIADOS A LA MEDIDA DEL TR	100
C.1	Ruido Propio Generado por el Filtro Paso Banda.....	100
C.2	Error por Distorsión de Fase	102
ANEXO D:	TR MEDIDO CON DIFERENTES MÉTODOS	104
D.1	Valores Promedio de los Métodos de Medición	104
D.2	Comparación entre Resultados	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		107
AGRADECIMIENTOS		110

ÍNDICE DE FIGURAS

2. EL CAMPO ACÚSTICO EN RECINTOS

Fig. 2.1 Atenuación del sonido en función de la distancia a la fuente de excitación, en situación de campo acústico reverberante. [...].	6
Fig. 2.2 Distribución de la presión acústica en un recinto paralelepípedo [...].	8
Fig. 2.3 Distribución de la presión acústica de un modo axial [...].	9
Fig. 2.4 Distribución de la presión acústica de un modo tangencial [...].	9
Fig. 2.5 Distribución de la presión acústica de un modo oblicuo [...].	9-10
Fig. 2.6 Delimitación de las cuatro regiones características de los modos propios de una sala.	10
Fig. 2.7 Rango de frecuencias del campo predominantemente modal y difuso en un volumen cúbico, en función de su volumen. [...].	11
Fig. 2.8 Niveles de presión sonora en el salón de una vivienda, medidos en una malla de 6x6 puntos a 1.7 m del suelo, [...].	13

3. MÉTODO CLÁSICO

Fig. 3.1 Barrido manual: círculo (1), helicoide (2), cilíndrica (3) y de tres semicírculos (4).	17
Fig. 3.2 Número de muestras discretas para cuatro diferentes trayectorias tomadas en un punto.	18
Fig. 3.3 Medición en un rincón, donde la distancia d debe estar entre 0,3 y 0,4 m en relación a las paredes (1) y techo (2).	19
Fig. 3.4 Tiempo del decaimiento del nivel de presión sonora en función del nivel de potencia de la fuente y del nivel de ruido de fondo. [...].	22
Fig. 3.5 Diagrama del decaimiento teórico (a) y real (b) del tiempo de reverberación en una banda de frecuencia. [...].	23
Fig. 3.6 Decaimiento en bandas de octava del nivel de presión acústica en un recinto pequeño, [...].	26

4. MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Fig. 4.1 Respuesta al impulso de un recinto (RIR).	29
Fig. 4.2 Respuesta al impulso de un recinto en función de la frecuencia.	30
Fig. 4.3 Comparación entre el método clásico y de la función de transferencia, mediante la medición de la RIR, para obtención del decaimiento sonoro en ensayos de tiempo de reverberación, [...].	31

Fig. 4.4 Barrido sinusoidal (<i>Sine Sweep Signal</i>).	33
Fig. 4.5 Barrido sinusoidal lineal y logarítmico, creados en el dominio de la frecuencia.	34
Fig. 4.6 Deconvolución lineal para obtención de la RIR. [...].	35
Fig. 4.7 Excitación y decaimiento de la respuesta en función de la frecuencia (<i>waterfall</i>).	37

5. MÉTODO DE LA SEÑAL IMPULSIVA

Fig. 5.1 Comparativo de diferentes calibres de pistola, en bandas de octava e incidencia a 0°.	40
Fig. 5.2 Espectro de nivel de exposición sonora SEL en bandas de tercio de octava, de una pistola Ekol special 99, de calibre 9 mm.	41

6. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

Fig. 6.1 Caso de estudio 1 - Salas de juntas, ETSA-UVa.	48
Fig. 6.2 Caso de estudio 2 - Aulas, ETSA-UVa.	48
Fig. 6.3 Caso de estudio 3 - Departamento de Física Aplicada, ETSA-UVa.	48
Fig. 6.4 Cadena de medida. Método clásico (ISO 16283-1).	50
Fig. 6.5 Cadena de medida. Método de la función de transferencia con un canal de entrada (ISO 18233 e ISO 16283-1).	51
Fig. 6.6 Cadena de medida. Método de la señal impulsiva (Dežetak et alii e ISO 16283-1).	52
Fig. 6.7 Salas de juntas. Puntos de excitación (F1 y F2) y puntos de muestreo espacial de la medición en el recinto emisor (1-12) y recinto receptor (1-10).	54
Fig. 6.8 Aulas. Puntos de excitación (F1 y F2) y puntos de muestreo espacial de la medición en el recinto emisor (1-12) y recinto receptor (1-10).	54
Fig. 6.9 Departamento. Puntos de excitación (F1 y F2) y puntos de muestreo espacial de la medición en el recinto emisor (1-5) y recinto receptor (1-5).	55
Fig. 6.10 REW (Room EQ Wizard). Opciones del programa para la configuración de los parámetros del barrido sinusoidal exponencial que se usa para excitar la sala y calcular la RIR:[...].	56
Fig. 6.11 REW (Room EQ Wizard). Interfaz del software y resultado de la medición de una RIR en un rango de frecuencias desde 30 Hz a 6 kHz. ^[44]	57
Fig. 6.12 REW (Room EQ Wizard). Interfaz del software y visualización de un conjunto de 20 resultados de la RIR de un par de recintos adyacentes, en un rango de frecuencias desde 30 Hz a 6 kHz: [...].	57
Fig. 6.13 Salas de juntas. Puntos de excitación en el recinto emisor (F1-10), y puntos de medición (1 y 2) en el recinto emisor y receptor.	58
Fig. 6.14 Aulas. Puntos de excitación en el recinto emisor (F1-12), y puntos de medición (1 y 2) en el recinto emisor y receptor.	59
Fig. 6.15 Departamento. Puntos de excitación (F1-5), y puntos de medición (1 y 2) en el recinto emisor y receptor.	59

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fig. 7.1 Salas de juntas. Comparación de la Diferencia de Niveles D – Método clásico y Métodos de la señal impulsiva.	63
Fig. 7.2 Salas de juntas. Método Impulsivo (1): [...].	64
Fig. 7.3 Salas de juntas. Método Impulsivo (2): [...].	64
Fig. 7.4 Salas de juntas. Método Impulsivo Dividido: [...].	65
Fig. 7.5 Salas de juntas. Método Impulsivo 16283-1: [...].	65
Fig. 7.6 Salas de juntas. Comparación de la Diferencia de Niveles D entre métodos.	67
Fig. 7.7 Aulas. Comparación de la Diferencia de Niveles D entre métodos.	68
Fig. 7.8 Aulas. Método Impulsivo: Promedios en el recinto emisor y receptor. [...].	69
Fig. 7.9 Aulas. Método Impulsivo 16283-1: Promedios en el recinto emisor y receptor. [...].	69
Fig. 7.10 Departamento de Física Aplicada. Comparación de la Diferencia de Niveles D entre métodos.	70
Fig. 7.11 Departamento de Física Aplicada. Método Impulsivo 16283-1: Promedios en el recinto emisor y receptor. [...]	71
Fig. 7.12 Departamento de Física Aplicada. Método Impulsivo Globos: Promedios en el recinto emisor y receptor. [...]	71
Fig. 7.13 Departamento de Física Aplicada. Punto de excitación F y de medición 1-3, para verificar la atenuación por divergencia geométrica del nivel de presión sonora [...].	73
Fig. 7.14 Zona común del Departamento de Física Aplicada. Atenuación del nivel de presión sonora por divergencia geométrica, con la excitación de un ruido rosa.	73
Fig. 7.15 Zona común del Departamento de Física Aplicada. Atenuación del nivel de presión sonora por divergencia geométrica, con la excitación de la explosión de globos.	74
Fig. 7.16 Zona común del Departamento de Física Aplicada. Atenuación del nivel de presión sonora por divergencia geométrica, con la excitación del disparo de una pistola de fogeo.	75
Fig. 7.17 Promedio de los valores de desviación típica del muestreo espacial en los recintos emisores de los casos de estudio, para cada método de medición.	76
Fig. 7.18 Promedio de los valores de desviación típica del muestreo espacial en los recintos receptores de los casos de estudio, para cada método de medición.	76
Fig. 7.19 Promedio de los valores de desviación típica del muestreo espacial, en los recintos emisores de los ensayos con el 'Método Impulsivo 16283-1': comparación entre casos de estudio.	77
Fig. 7.20 Promedio de los valores de desviación típica del muestreo espacial, en los recintos receptores de los ensayos con el 'Método Impulsivo 16283-1': comparación entre casos de estudio.	77
Fig. 7.21 Sala de juntas. Resultado de la ecualización de la señal aleatoria (EQ MyNoise), o ruido rosa efectivo, medido a un metro de la fuente en el recinto emisor. [...].	79
Fig. 7.22 Sala de juntas. Diferencia entre bandas de frecuencia, en relación a la frecuencia inferior, antes (Diferencia PN REW) y después (Diferencia EQ MyNoise) de la ecualización del ruido aleatorio. [...].	80
Fig. 7.23 Aulas. Resultado de la ecualización de la señal aleatoria (EQ MyNoise), o ruido rosa efectivo, medido a un metro de la fuente en el recinto emisor. [...]	81

Fig. 7.24 Aulas. Diferencia entre bandas de frecuencia, en relación a la frecuencia inferior, antes (Diferencia PN REW) y después (Diferencia EQ MyNoise) de la ecualización del ruido aleatorio. [...]	81
Fig. 7.25 Departamento de Física Aplicada. Resultado de la ecualización de la señal aleatoria (EQ MyNoise), o ruido rosa efectivo, medido a un metro de la fuente en el recinto emisor. [...]	82
Fig. 7.26 Departamento de Física Aplicada. Diferencia entre bandas de frecuencia, en relación a la frecuencia inferior, antes (Diferencia PN REW) y después (Diferencia EQ MyNoise) de la ecualización del ruido aleatorio. [...]	82

ANEXO A: PROMEDIOS POR MÉTODO DE MEDICIÓN

Fig. A.1 Salas de juntas. Método Clásico 16283-1 (1): Promedios en el recinto emisor y receptor.	87
Fig. A.2 Salas de juntas. Método Clásico 16283-1 (2): Promedios en el recinto emisor y receptor.	87
Fig. A.3 Salas de juntas. Método FT 50-5k 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.	88
Fig. A.4 Salas de juntas. Método FT 50-200 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.	88
Fig. A.5 Aulas. Método Clásico 16283-1: Promedios en el recinto emisor y receptor.	89
Fig. A.6 Aulas. Método FT 50-5k 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.	89
Fig. A.7 Aula. Método FT 50-200 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.	90
Fig. A.8 Departamento de Física Aplicada. Método Clásico 16283-1: Promedios en el recinto emisor y receptor.	91
Fig. A.9 Departamento de Física Aplicada. Método FT 50-5k 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.	91
Fig. A.10 Departamento de Física Aplicada. Método FT 50-5k 12s: Promedios en el recinto emisor y receptor.	92

ANEXO B: IMÁGENES DE LOS ENSAYOS

Fig. B.1 Ensayo en la sala de juntas, recinto emisor. Verificación del resultado de la ecualización de la señal aleatoria generada por la fuente. [...]	93
Fig. B.2 Ensayo en la sala de juntas, recinto emisor. Método de la función de transferencia. [...]	93
Fig. B.3 Ensayo en la sala de juntas, recinto emisor. Método de la función de transferencia. [...]	94
Fig. B.4 Ensayo en la sala de juntas, medición del TR en el recinto receptor. Método de la función de transferencia. [...]	94
Fig. B.5 Ensayo en la sala de juntas, medición del TR en el recinto receptor. Método de la función de transferencia. [...]	95
Fig. B.6 Ensayo en el aula, recinto emisor. Verificación del resultado de la ecualización de la señal aleatoria generada por la fuente. [...]	95
Fig. B.7 Ensayo del cerramiento entre aulas, recinto receptor. Método clásico ISO 16283-1. [...]	96
Fig. B.8 Aula, recinto emisor.	96

Fig. B.9 Ensayo en el aula, medición del TR en el recinto receptor. Método de la función de transferencia.	97
Fig. B.10 Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto receptor. Método de la función de transferencia.	97
Fig. B.11 Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto receptor. Método de la función de transferencia.	98
Fig. B.12 Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto emisor. Método de la función de transferencia.	98
Fig. B.13 Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto emisor. Método de la función de transferencia.	99
Fig. B.14 Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto receptor. Método de la función de transferencia.	99

ANEXO C: ERRORES ASOCIADOS A LA MEDIDA DEL TR

Fig. C.1 Respuesta al impulso de un filtro paso banda de tercio de octava.	101
Fig. C.2 Influencia del ancho de banda B en el decaimiento del nivel de presión sonora.	102
Fig. C.3 Influencia del ancho de banda del filtro en el decaimiento: [...]	102

ANEXO D: TR MEDIDO CON DIFERENTES SEÑALES SONORAS

Fig. D.1 Aulas. Puntos de excitación F1-3 y medición 1-3, en el recinto receptor.	104
Fig. D.2 Aulas. Tiempo de reverberación en el recinto receptor. Método de Schroeder: barrido sinusoidal. Medición realizada con el software REW.	105
Fig. D.3 Aulas. Tiempo de reverberación en el recinto receptor. Método de Schroeder: explosión de globos. Medición realizada con el sonómetro analizador Solo Black 01dB.	105
Fig. D.4 Aulas. Tiempo de reverberación en el recinto receptor. Método de Schroeder: disparo de pistola de foguero. Medición realizada con el sonómetro analizador Solo Black 01dB.	106
Fig. D.5 Aulas. Tiempo de reverberación en el recinto receptor. Comparación de los resultados obtenidos a través del método de Schroeder (T_{30}), a partir de diferentes tipos de fuente de excitación.	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.1 Ensayos realizados en el estudio experimental, según la nomenclatura adoptada.	60
Tabla 7.1 Comparación de las distancias en el recinto emisor de cada caso de estudio.	78

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La definición de los métodos de excitación y medición del campo sonoro constituye una parte esencial de los estudios en aislamiento de edificios. El ambiente sonoro en el recinto emisor acústicamente excitado se puede generar de diferentes maneras a través de distintas fuentes de ruido. En el método de medición “clásico”, normalizado por la ISO 16283-1, es común enfrentarse a relaciones de señal-ruido de fondo pobres en el recinto receptor.^[1,2] Esta situación ocurre principalmente cuando la fuente dodecaédrica convencional utilizada no emite suficiente energía acústica a bajas y altas frecuencias, y donde el aislamiento a ruido aéreo de las particiones es generalmente mayor.

La dificultad relacionada con la excitación del recinto emisor también se puede agravar al medir cerramientos con altos niveles de aislamiento a ruido aéreo o en ambientes con elevado nivel de ruido de fondo. En estas circunstancias, resulta difícil obtener una adecuada relación señal-ruido y cumplir los requisitos de la norma ISO 16283-1. Otra dificultad surge cuando hay que excitar todos los modos propios de la sala emisora, principalmente a bajas frecuencias y en grandes recintos utilizando una fuente dodecaédrica convencional.^[3]

Con los “nuevos” métodos de medición acústica en edificios y recintos, normalizados por la ISO 18233 en el año de 2006^[4], se busca solventar estas limitaciones del método clásico por medio de procedimientos alternativos de excitación y medición. Puesto que estos métodos normalizados emplean señales de excitación deterministas, también se garantiza una alta repetibilidad de la excitación sonora.^[2] El método de la función de transferencia aplicado a mediciones de aislamiento acústico y normalizado por la ISO 18233 se presenta como una alternativa que posee como ventaja primordial, si se compara con la técnica de medición clásica con ruido aleatorio, la posibilidad de extender el rango dinámico de medición y el consecuente aumento de la relación señal-ruido en el recinto receptor, según la norma de aplicación del método. Al mejorar la relación señal-ruido, se pretende medir con más precisión a bajas frecuencias, sin la necesidad de niveles de potencia sonora extremadamente altos, lo que resultaría en distorsiones no lineales del altavoz.^[5]

Además de las limitaciones de orden técnico, relacionadas con la capacidad limitada de emisión de energía sonora a través de un altavoz dodecaédrico, y el efectivo cumplimiento de los requisitos mínimos de la relación señal-ruido en el recinto receptor, el método clásico de medición del aislamiento a ruido aéreo *in situ* tiene también limitaciones de orden práctico, en relación al volumen y al peso de los instrumentos de medición que se deben transportar. Frente a estos inconvenientes, Deželak et al.^[3] proponen en un estudio reciente un método alternativo de medición que usa señales de excitación impulsivas a partir de disparos de pistolas de fogeo. Las ventajas primordiales serían la rapidez del ensayo, la facilidad para transportar la instrumentación al local del ensayo y el alto nivel de potencia de la fuente a bajas frecuencias. El método aquí denominado ‘método de la señal impulsiva’ se describe en la fundamentación teórica y se implementa en el estudio experimental de este trabajo, a fin de comprobar su adecuación en medidas de aislamiento a ruido aéreo entre recintos.

Por lo tanto, la memoria que se presenta a continuación busca comparar los resultados de tres métodos de medición del aislamiento a ruido aéreo: el método clásico, el método de la función de transferencia y el método de la señal impulsiva, siendo que los dos primeros están regidos por normativas internacionales, y el último, que se trata de un método experimental recién publicado, en vías de comprobación experimental.

Los objetivos de este trabajo son:

- Describir el estado del arte de los métodos de medición de aislamiento a ruido aéreo *in situ* existentes.
- Implementar los procedimientos de medición en un estudio experimental comparando los resultados obtenidos entre los diferentes métodos y sus respectivas variaciones, respecto a las características de las señales sonoras usadas para excitar el recinto emisor.
- Comparar y discutir la coherencia entre métodos de medición, la dispersión de las medidas de muestreo y la influencia de las características de la señal de excitación en los resultados.

En la Parte I de este trabajo, consistente de los capítulos del 2 al 5, se realiza una revisión teórica de los métodos de medición del aislamiento a ruido aéreo *in situ* entre recintos. El capítulo 2 revisa los fundamentos teóricos del campo acústico en espacios cerrados, con enfoque en los modos propios de un volumen paralelepípedo, su comportamiento frente a la excitación sonora del recinto y la medición de los niveles de presión sonora en el rango de frecuencias correspondiente al campo modal de la sala. La comprensión del comportamiento del campo sonoro en espacios cerrados es fundamental para un análisis crítico de los métodos de medición y caracterización en acústica arquitectónica.

El capítulo 3 describe el procedimiento de medición del método clásico y presenta los requisitos de la norma ISO 16283-1. El apartado 3.2 concretamente, describe con detenimiento la medición del tiempo de reverberación, dado que esta medida forma parte del ensayo de aislamiento que se realiza en el recinto receptor. El énfasis en la revisión teórica sobre la medida del tiempo de reverberación se debe a que, al introducir el método de la función de transferencia, resulta más intuitivo explicar primero el método de Schroeder para medición del tiempo de reverberación, pues ambos se basan en la medición de la respuesta al impulso del recinto (RIR).

Los capítulos 4 y 5 presentan los “nuevos” métodos de medición del aislamiento acústico a ruido aéreo, desde el punto de vista de los tipos de señal empleados y procedimientos de medición. El capítulo 4 describe el procedimiento de determinación de la respuesta al impulso de un recinto (RIR) y la medición del tiempo de reverberación por el método de la respuesta al impulso integrada (método de Schroeder). Se describen dos tipos de señales deterministas, el MLS y el barrido de tonos sinusoidal, y su aplicación en la medición de la respuesta al impulso. Los criterios de la ISO 18233 para determinación del nivel de aislamiento entre recintos y el cálculo de la diferencia de niveles D de este método se presentan en el apartado 4.5.

El capítulo 5 describe el método de la señal impulsiva, las principales características de las fuentes sonoras de ruido impulsivo aplicadas en ensayos de acústica de edificaciones, las ventajas

del disparo de una pistola de fogeo según los autores de la bibliografía consultada, y el procedimiento de cálculo de la diferencia de niveles entre recintos, que se presenta en el apartado 5.3.

En la Parte II, consistente de los capítulos del 6 al 8, se aplican los nuevos métodos vistos en un estudio experimental realizado en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid. El capítulo 6 describe los tres casos de estudio, la instrumentación y *software* de procesado utilizado, y la implementación de los métodos de medición. En el apartado 6.3.4 se resume en una tabla cada variación del método de medición utilizado en los casos de estudio. En el capítulo 7 se presentan y se discuten los resultados de las mediciones, de acuerdo con los objetivos que se plantean en el estudio experimental. Finalmente en el capítulo 8, se presentan las conclusiones y futuras líneas de investigación.

El trabajo que se presenta a continuación, para optar al título de Máster en Ingeniería Acústica y Vibraciones por las Universidades de Valladolid y de León, está redactado íntegramente en castellano, aunque no sea la lengua nativa del autor.

PARTE I : ESTADO DEL ARTE

Revisión teórica de los métodos de
medición del aislamiento a ruido
aéreo *in situ*

2. EL CAMPO ACÚSTICO EN RECINTOS

La comprensión del comportamiento del campo sonoro en espacios cerrados es fundamental para un análisis crítico de los métodos de medición en acústica arquitectónica. En este capítulo, se introducen los principales conceptos que describen la propagación del sonido en salas, en especial a bajas frecuencias y para volúmenes pequeños, con un enfoque en las características del campo acústico modal y difuso de un recinto.

2.1 Campo Acústico Reverberante

En la acústica de la edificación, la condición de campo libre se produce apenas en cámaras anecoicas. En los espacios cerrados, además del sonido directo, las reflexiones que provienen de las superficies interfieren en la conformación del campo acústico, lo que resulta en una compleja distribución de presión sonora en función del tiempo y espacio. Esta complejidad se debe sobre todo a cinco características, intrínsecas a la propagación del sonido en recintos:[6]

- 1) Resonancia asociada a los modos propios de la cavidad de la sala;
- 2) Reverberación, en la cual la densidad de energía del sonido disminuye exponencialmente;
- 3) Patrones de distribución de la presión sonora en la sala;
- 4) Tendencia a la uniformidad del nivel de presión sonora en el campo, como respuesta a una excitación sonora de banda ancha;
- 5) Un grado de imprevisibilidad del comportamiento acústico en situaciones reales, cuando los recintos contienen objetos de varios tamaños, formas y materiales, principalmente a altas frecuencias.

La gráfica de la Fig. 2.1 resume la transición entre los diferentes campos sonoros existentes en una sala en función de la distancia a la fuente, donde coexiste la influencia del campo libre y reverberante. Las distancias y los niveles de presión sonora dependen de las características de la sala (volumen, geometría, absorción equivalente de las superficies) y del nivel de potencia de la fuente de excitación.[7] En un recinto cuyos materiales de las superficies son muy absorbentes, el nivel de incremento sonoro debido a las reflexiones será menor.

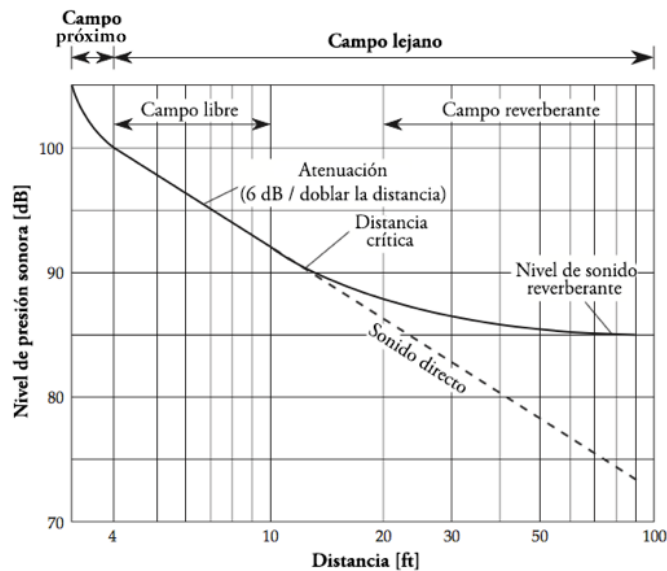


Fig. 2.1: Atenuación del sonido en función de la distancia a la fuente de excitación, en situación de campo acústico reverberante. Se relacionan las condiciones de campo libre y campo reverberante con el decaimiento del nivel de presión sonora.^[8]

En la región denominada campo próximo, no es posible considerar la fuente de excitación como una fuente puntual, y el nivel de presión sonora disminuye aproximadamente 12 dB al duplicar la distancia. Al aumentar la distancia del receptor en relación a la fuente, predomina la situación de campo libre – en esta situación la atenuación es de 6 dB al duplicar la distancia – hasta que se alcanza una distancia crítica, a partir de la cual el nivel sonoro del campo reverberante predomina por encima de la radiación acústica directa, disminuyendo el nivel de atenuación sonora con el incremento de la distancia a la fuente.

2.2 Campo Acústico Difuso

En situación de campo reverberante, el campo sonoro difuso ocurre cuando la densidad de energía sonora en un volumen es homogénea. Idealmente, todas las ondas de sonido que llegan a un determinado punto en el espacio tendrían una dirección de incidencia aleatoria. En realidad, la disipación de energía impide la formación de un campo difuso ideal, y en un recinto cerrado existirán flujos de energía sonora que parten desde la fuente y son absorbidas por las superficies existentes en la sala y por el aire. Además, el concepto de campo difuso también depende del rango de frecuencias que se considere. En razón del comportamiento acústico modal de la sala, las ondas de sonido que llegan a un determinado punto de la sala pueden provenir de un limitado número de direcciones.^[9]

Aun así el concepto de campo difuso es útil para simplificaciones del comportamiento acústico en una sala, incluso para la definición de métodos de medición y predicción del aislamiento acústico entre recintos.

2.3 Campo Acústico Modal

El término ‘modo propio’ de una sala se refiere a un modo de resonancia que se determina a partir de sus condiciones de frontera específicas.^[9] El modelo ideal del campo acústico modal en

un recinto supone que no existe interacción de los modos propios con el sonido directo que se produce por la fuente de excitación, o con la energía acústica que se propaga en los elementos de delimitación: techo, paredes y suelo. En este modelo de campo sonoro la fuente de ruido es imaginaria y no interfiere en la formación de los modos de resonancia.

Un estudio más riguroso y abstracto del comportamiento acústico en los recintos cerrados se basa en la solución de la ecuación de onda, corregida en función de las condiciones de frontera y de las propiedades físicas de las superficies.^[8] El comportamiento de la presión p del campo sonoro en un recinto, basado en la ecuación de onda, se puede describir a través de la ecuación de Helmholtz:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde k es el número de onda.

Las condiciones de frontera se pueden expresar a partir de la impedancia Z de los materiales de las superficies:

$$Z \frac{\partial p}{\partial n} + j\omega\rho_0 p = 0 \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde ρ_0 es la densidad del aire y $\partial p / \partial n$ es la componente del gradiente de presión sonora en la dirección normal a la superficie de frontera.

La ecuación de Helmholtz (Ec. 2.1), combinada con la condición de frontera en función de la impedancia (Ec. 2.2), se puede resolver sólo para determinados valores discretos k_n de un número de onda k (*eigenvalues*). Cada solución discreta está relacionada con una frecuencia angular característica, también conocida como frecuencia propia f_n (*eigenfrequency*):

$$f_n = \frac{ck_n}{2\pi} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Cada una de las soluciones k_n corresponde a lo menos a una solución de presión p_n , en función del sistema de coordenadas. Tales soluciones de la ecuación de Helmholtz constituyen distribuciones características de la amplitud de presión sonora, denominadas modos normales o propios de la sala.^[8]

Para una condición de frontera que considera un volumen paralelepípedo de dimensiones L_x , L_y y L_z , y con todas las superficies rígidas con impedancia $Z = \infty$, la solución para la ecuación de Helmholtz (Ec. 2.1) se puede expresar según la Ec. 2.4:

$$p_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = A \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right) \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde la amplitud A es una constante arbitraria, y n_x , n_y y n_z son números enteros positivos. La frecuencia propia $\omega_{n_x n_y n_z}$, asociada a cada solución de $p_{n_x n_y n_z}$, será igual a $ck_{n_x n_y n_z}$, siendo:

$$k_{n_x n_y n_z} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Cada uno de los modos normales de una sala se puede interpretar como una onda estacionaria tridimensional, constituida por regiones de presión máxima y mínima, y superficies nodales, como se muestra en la Fig. 2.2:

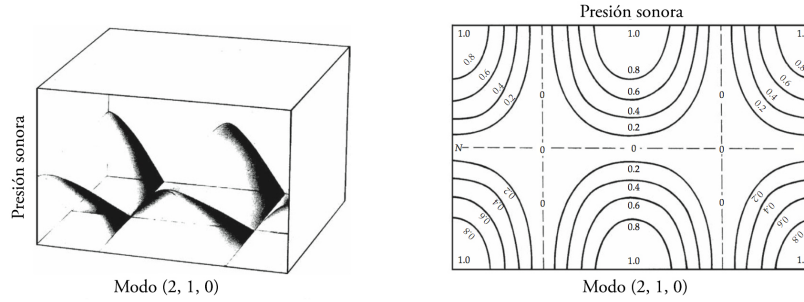


Fig. 2.2: Distribución de la presión acústica en un recinto paralelepípedo, en el modo (2, 1, 0).^[8]

Para determinar el número de modos propios N en una banda de frecuencia B en una sala paralelepípeda, se puede proceder de dos maneras: aplicar la Ec. 2.5 para calcular la frecuencia de cada uno de los modos individualmente y agruparlos en la banda de frecuencia correspondiente, o emplear un cálculo de densidad modal estadística del número de modos propios N en una banda.^[9]

La cantidad de frecuencias propias, en un rango que va desde cero a una frecuencia límite f , se puede estimar a través de la Ec. 2.6:

$$N_f \approx \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi}{4} S \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8} \left(\frac{f}{c}\right) \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde V es el volumen de la sala, c es la velocidad del sonido en el medio, S el área de la frontera, y $L = 4(L_x + L_y + L_z)$, en función de las dimensiones de la sala paralelepípeda.

A partir del último término de la Ec. 2.6, se puede estimar el promedio del espaciamiento de las frecuencias adyacentes a una determinada frecuencia propia f :

$$\langle \delta f \rangle \approx \frac{c^3}{4\pi V f^2} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde c es la velocidad del sonido en el medio, V es el volumen de la sala y f la frecuencia propia.

Se observa en la Ec. 2.7 que la distancia entre frecuencias de modos propios adyacentes $\langle \delta f \rangle$ es inversamente proporcional a la frecuencia propia, de donde se concluye que los modos de resonancia a bajas frecuencias de un recinto están relativamente más separados entre sí, que los modos propios a altas frecuencias.^[8] La frecuencia de Schroeder f_s (Ec. 2.8) estima una frecuencia de corte a partir de la cual la separación entre los modos propios, y su influencia en la distribución espacial del nivel de presión sonora en una sala, se puede considerar despreciable:

$$f_s = \frac{5000}{\sqrt{V \langle \delta \rangle}} \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde V [m³] es el volumen y T [s] es el tiempo de reverberación de la sala.

Esta es una descripción ideal y formalista de la distribución de la presión sonora en un recinto, de aplicación práctica limitada, puesto que solo es válida para geometrías simples, de superficies idealmente rígidas. Sin embargo, a pesar de la simplificación que este modelo de análisis requiere, es de gran utilidad en situaciones de campo no difuso a bajas frecuencias, donde influyen los primeros modos propios de la sala.

2.4 Tipos de Modos Propios y Distribución Espectral

Para calcular el comportamiento ideal del sonido a partir del análisis modal en una sala, conviene utilizar un método numérico de cálculo. En las figuras 2.3 a 2.5 se presentan soluciones numéricas resultantes de simulaciones del comportamiento de diferentes tipos de modos propios – axial, tangencial y oblicuo – de una sala de 5,2 x 3,8 x 2,8 m, que utiliza el método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD), con una resolución de 0,1 m.^[10] Las zonas representadas en blanco son zonas de máximos de presión sonora:

- Modos axiales: La presión sonora solo varía a lo largo de la longitud de la sala, sin variaciones de presión a lo largo de la anchura y de la altura.

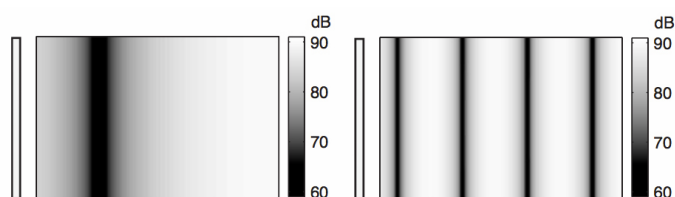


Fig. 2.3: Distribución de la presión acústica de un modo axial a 20 Hz (izquierda) y a 114 Hz (derecha).^[10]

- Modos tangenciales: No existen variaciones de presión a lo largo de la altura de la sala.

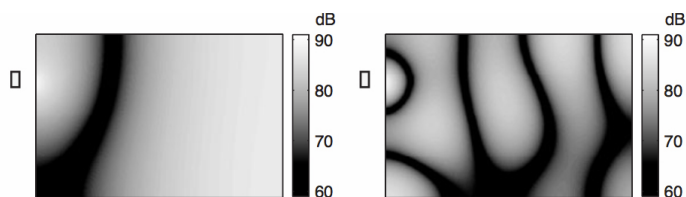
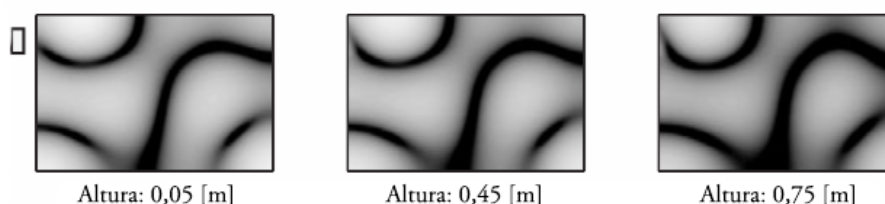


Fig. 2.4: Distribución de la presión acústica de un modo tangencial a 20 Hz (izquierda) y a 114 Hz (derecha).^[10]

- Modos oblicuos: La presión acústica varía en todos los ejes del recinto.



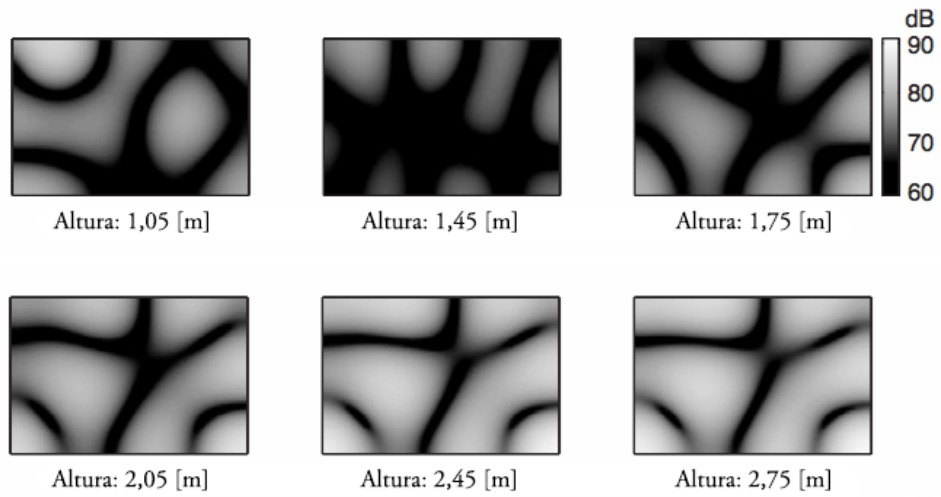


Fig. 2.5: Distribución de la presión acústica de un modo oblicuo a 114 Hz.^[10]

Las ondas estacionarias que se forman, en las tres categorías de distribución de presiones, generan altos niveles de presión acústica en las fronteras del recinto: superficies, aristas y rincones, dependiendo del tipo de modo. Sin embargo, una característica común a todos los modos propios de una sala es que presentan altos niveles de presión en el área próxima a los rincones. Esto hace que los rincones sean regiones del recinto ideales para medir las presiones máximas existentes en el campo acústico modal, a cualquier frecuencia.^[10]

En función del espectro de frecuencias audibles, las frecuencias de los modos propios de una sala se pueden clasificar en cuatro grupos, según el esquema de la Fig. 2.6:

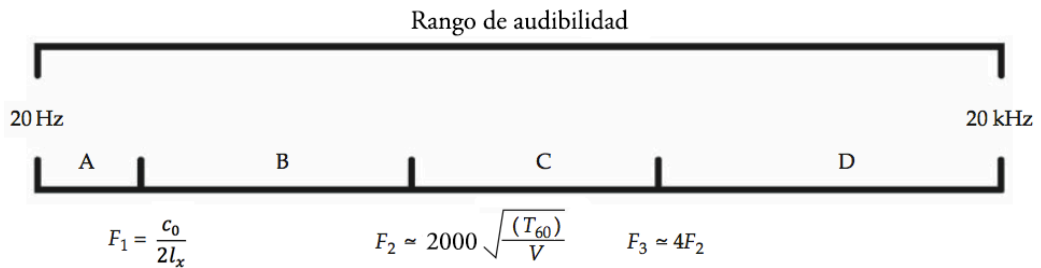


Fig. 2.6: Delimitación de las cuatro regiones características de los modos propios de una sala.^[7]

- A) Frecuencias por debajo del primer modo axial F_1 , que está en función de la velocidad del sonido en el medio c_0 , y de la longitud de la sala l_x . Por debajo de esta primera frecuencia de resonancia, el campo acústico se comporta como una cámara de presión, que se excita de manera uniforme debido a la ausencia de ondas estacionarias que generan una gran variación espacial de la presión sonora. Sin embargo, en situaciones reales de medición a estas frecuencias, se puede identificar una significativa variación espacial del nivel de presión sonora, debido al comportamiento del campo directo y de la interferencia de los modos de resonancia de los cerramientos.
- B) Frecuencias entre el primer modo axial da sala F_1 y la frecuencia de corte F_2 , también conocida como la frecuencia de Schroeder (Ec. 2.8). Por encima de F_1 , predomina el campo

acústico modal de baja densidad, que genera un campo cuyos niveles de presión acústica son poco uniformes en función del espacio de la sala. Es la región de frecuencias cuyas longitudes de onda (λ) son del mismo orden de las dimensiones físicas del recinto.

- C) Cuando las frecuencias de los modos propios de la sala se encuentran muy próximas unas de otras, la presión en el campo acústico empieza a homogeneizarse en el espacio, aproximándose al comportamiento difuso característico de un campo con alta densidad modal. Esta transición entre el comportamiento modal de baja densidad y difuso ocurre en un intervalo que empieza en la frecuencia $F2$, y termina aproximadamente en $F3$, dos octavas por encima de la frecuencia de corte. Este rango de transición contiene frecuencias cuyo comportamiento es difícil de analizar, dado que sus longitudes de onda son grandes para una interpretación desde el punto de vista de la acústica geométrica (trazado de rayos) y pequeñas para un análisis desde el punto de vista de la acústica ondulatoria.
- D) Frecuencias cuyo comportamiento sonoro es esencialmente difuso en el recinto, y se pueden analizar a través de la teoría del trazado de rayos, concepto fundamental de la acústica geométrica. A estas frecuencias, el campo acústico presenta niveles de presión sonora uniformes en la zona central del recinto. En las regiones próximas a las fronteras – paredes, techo y suelo – se pueden medir niveles de presión más altos debido a la interferencia de ondas sonoras. Las zonas cercanas a las superficies tienen un nivel ≈ 3 dB más alto, ≈ 6 dB si se encuentra cerca de una arista y ≈ 9 dB si se mide en los rincones de la sala.^[9]

En general, los recintos cuyos volúmenes son inferiores a 30 m^3 presentan un campo sonoro por debajo de los 100 Hz dominado por un único o pocos modos de resonancia^[9]. El gráfico de la Fig. 2.7 ilustra la relación entre campo acústico difuso y modal en función del volumen cúbico de un recinto y de la frecuencia. Se observa asimismo cómo disminuye el rango de frecuencias que caracteriza el comportamiento de campo modal, a medida que aumenta el volumen de la sala:

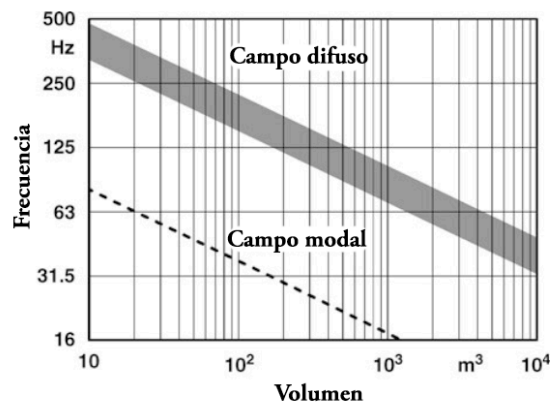


Fig. 2.7: Rango de frecuencias del campo predominantemente modal y difuso en un volumen cúbico, en función de su volumen. La banda en color gris delimita el intervalo de transición, y la línea discontinua, el primer modo de resonancia de la sala.^[11]

Las mediciones en campo modal, por ejemplo con filtro de tercio de octava a una frecuencia de 50 Hz, pueden presentar una diferencia significativa entre el nivel de presión sonora en la zona central del recinto y el nivel a pocos centímetros de los límites de la sala. En el muestreo

del campo sonoro de un recinto, utilizando como fuente de excitación una altavoz omnidireccional que emite una señal estacionaria de banda ancha, esta diferencia puede variar entre 17 y 28 dB, en función del punto de medición en la sala.^[12,13]

En mediciones del aislamiento acústico entre recintos, que requiere un promedio energético de las medidas del nivel de presión sonora tomadas en diferentes puntos de cada uno de los recintos – emisor y receptor – excitados por una señal de banda ancha, la mayor dificultad que se presenta respecto a la reproducibilidad de los resultados es el muestreo espacial por debajo de la frecuencia de corte de la sala.^[12]

2.5 Excitación del Campo Modal en un Recinto

La definición de los métodos de excitación y medición es un prerrequisito importante para los estudios de acústica y vibraciones, como también para la investigación en acústica aplicada. Las mediciones de aislamiento en edificios se basan en ambientes acústicamente excitados, que se pueden generar de múltiples maneras.^[14]

Al posicionar un altavoz que emite una señal de banda ancha en un rincón de una sala, sobre todo en los recintos pequeños, todos los modos de resonancia se excitan, dado que todos ellos tienen sus terminaciones – con áreas de presión acústica máxima – en los rincones. Para mediciones del aislamiento acústico a ruido aéreo en campo no difuso, es necesario excitar la mayor cantidad posible de modos propios del recinto emisor. Se debe posicionar la fuente de ruido cerca de un rincón, y asegurar que el sonido del campo directo del altavoz no excite significativamente las paredes y suelo. Cuando la fuente sonora está demasiado lejos de las paredes o centrada en el recinto, los primeros modos se excitan muy débilmente o simplemente no se excitan.^[7,9]

En un recinto con un volumen $V = 50 \text{ m}^3$ y tiempo de reverberación $T = 0,5 \text{ s}$, la frecuencia de corte es aproximadamente 200 Hz. En estos recintos, cuyas dimensiones son comparables a las longitudes de onda relativos a frecuencias del espectro audible, el fenómeno de la separación de los modos propios ocurre especialmente a bajas frecuencias. En recintos con un volumen inferior a 30 m^3 , existirá uno o pocos modos propios en las bandas de tercio de octava entre 50 y 100 Hz. Estos modos son, en general, los modos axiales (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (2,0,0), (0,2,0); los modos tangenciales (1,1,0), (0,1,1), (1,0,1) y el modo oblicuo (1,1,1).^[8,9]

La medición del aislamiento a ruido aéreo entre recintos en el rango desde 100 Hz a 3500 Hz es útil para caracterizar la protección acústica frente a fuentes sonoras como la palabra y actividades en general; sin embargo, con el incremento de la utilización de altavoces y la tecnología de reproducción de audio más potente a bajas frecuencias (*subwoofers*), se ha demandado un incremento significativo del aislamiento por debajo de los 100 Hz, en especial entre recintos de viviendas. Hopkins y Turner^[12] destacan la importancia de la adopción de un método distinto para las mediciones acústicas a estas frecuencias en recintos de volumen reducido, en las bandas de 50, 63 y 80 Hz. La problemática relacionada con la distribución del nivel de presión sonora a bajas frecuencias en un recinto pequeño se puede observar en el diagrama de la Fig. 2.8, que compara la distribución del nivel de presión acústica en la banda de octava de 63 Hz y 250 Hz, medidos en un recinto de una vivienda de planta rectangular. Se observa

la acentuada variación de niveles de presión sonora en la banda de 63 Hz, comparada a la de 250 Hz, que está próxima a la frecuencia de corte de la sala:

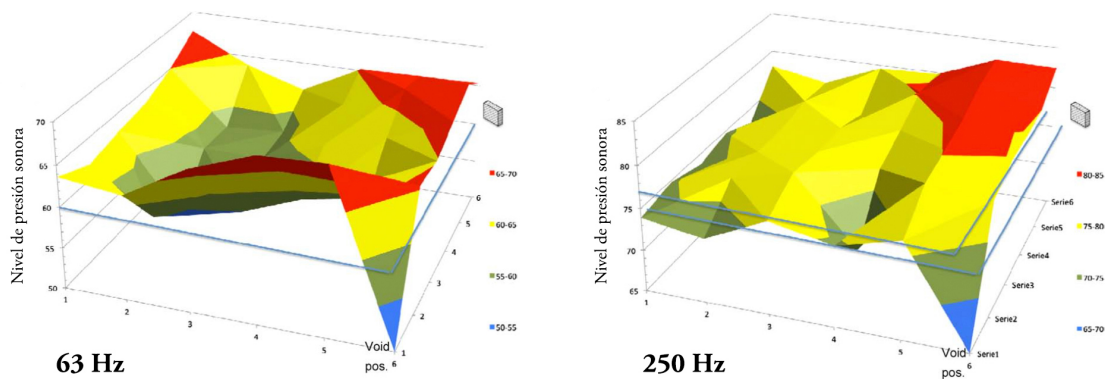


Fig. 2.8: Niveles de presión sonora en el salón de una vivienda, medidos en una malla de 6x6 puntos a 1.7 m del suelo, con el altavoz ubicado en la esquina superior derecha del recinto, en la banda de octava de 63 Hz (izquierda) y 250 Hz (derecha).^[13]

Otros fenómenos de propagación y transmisión del ruido pueden acentuar la variabilidad de los niveles de presión sonora en un recinto. En una sala acoplada a otra acústicamente excitada, que comparten por lo menos una superficie de separación, el ruido a bajas frecuencias se puede amplificar por las resonancias de manera irregular, dificultando aún más la estimación de un promedio de niveles de presión acústica a estas frecuencias. Además, si ocurren coincidencias de resonancias de las estructuras que delimitan el recinto, o de otros volúmenes adyacentes a la sala, pueden ocurrir interacciones significativas en el sistema recinto-pared-recinto, que generen una variación espacial del nivel de presión sonora del orden de 10 a 30 dB en los modos a bajas frecuencias, dependiendo de las características físicas del sistema.^[11]

Un estudio sobre el acoplamiento entre los modos propios de vibración de una pared y los modos excitados en el recinto emisor de geometría rectangular^[15] sugiere que la respuesta vibracional de la pared es reforzada por los modos propios de la sala emisora. El ruido transmitido a través de la pared al recinto receptor está determinado por las propiedades del elemento separador y por las propiedades físicas del recinto emisor, en especial en las bajas frecuencias próximas a las frecuencias críticas del cerramiento, que pueden coincidir con los primeros modos de resonancia de la sala. En este estudio, Osipov et al. concluyen que el aislamiento a bajas frecuencias entre recintos depende de la geometría, de las dimensiones del sistema recinto-pared-recinto, del tiempo de reverberación y de la posición de la fuente de excitación.

2.6 Muestreo Espacial y Medición de la Señal de Excitación en Ensayos de Aislamiento

En una situación de campo reverberante difuso, el muestreo temporal y espacial del nivel de presión sonora se determina a partir de un promedio energético de diferentes posiciones de micrófono en puntos de la zona central de la sala. Se debe mantener una determinada distancia en relación a las superficies que delimitan el espacio y a la fuente de excitación, para que no influya en la medida los valores de presión sonora generados por interferencias de ondas próximas a los límites físicos del recinto, u ondas del campo próximo del altavoz. El objetivo es estimar un promedio del nivel de presión sonora en el recinto, con una baja incertidumbre asociada a la

medición.^[9,16] En un estudio sobre el cálculo de la incertidumbre de la medición del aislamiento a ruido aéreo entre recintos, Michalski^[5] concluye que uno de los principales factores relacionados con la incertidumbre asociada, independiente del método de medición adoptado, se debe a la existencia de variaciones de nivel de presión sonora en los campos acústicos generados para el ensayo.

Sin embargo, un muestreo representativo de los niveles a bajas frecuencias que refleje la percepción de los usuarios – que habitualmente ocupan los espacios junto a las paredes de los recintos – no puede limitarse a la zona central, puesto que los niveles de presión sonora más altos se encuentran en las zonas próximas a los rincones y cerca de las superficies del volumen de la sala.^[9,10] Por debajo de los 100 Hz, un promedio espacial del nivel de presión sonora en la zona central de un recinto pequeño es de poco interés sin medidas adicionales, dado que existen muy pocos modos de resonancia para crear una situación de campo reverberante. En este caso, se puede combinar las mediciones en el centro del recinto con mediciones realizadas en los rincones de la sala.^[17] Si las mediciones se realizan en el recinto receptor, no siempre ocurre que los niveles de presión más altos se encuentren próximos al elemento separador. De hecho hay investigaciones experimentales^[12] que muestran niveles de presión sonora más altos próximo a la pared opuesta al cerramiento separador.

Cuando se procede a determinar el aislamiento acústico de un cerramiento *in situ*, es importante asegurar que las mediciones que se realicen a bajas frecuencias sean adecuadas, pues en muchos de los recintos de una vivienda, los espacios en los que se desarrolla la actividad (descanso, lectura, trabajo...) están próximos a los cerramientos verticales, donde los niveles a bajas frecuencias resultan más elevados. Para identificar los niveles más elevados a bajas frecuencias, se recomienda medir en los cuatro rincones opuestos a la pared separadora en el recinto receptor, y en los cuatro rincones de la pared más distante de los altavoces en el recinto emisor, buscando alejar el punto de medición de la influencia de la radiación del campo directo y acentuar la situación de campo reverberante. Un método elaborado para bajas frecuencias en recintos (LFMP) presentado por Hopkins^[9], y basado en estudios empíricos publicados por Simmons^[13], fue al final adoptado por la norma ISO 16283-1, que se analiza en el capítulo a continuación.

3. MÉTODO CLÁSICO

En este capítulo se describen los principales requisitos y conceptos del método clásico aplicado al aislamiento a ruido aéreo entre recintos, en relación a la determinación de la diferencia de niveles D y del tiempo de reverberación TR , que son las dos medidas necesarias para evaluar las prestaciones de los elementos constructivos a la protección frente al ruido en edificios. Se denomina “clásico” el método presentado por la serie de normas internacionales ISO 16283, precedido por la serie ISO 140, sobre la medición del aislamiento acústico *in situ*.

3.1 Procedimiento y Requisitos de la Norma ISO 16283-1:2014

La norma ISO 16283-1:2014, sobre la medición *in situ* del aislamiento acústico a ruido aéreo en los edificios y en los elementos de construcción, sustituye y anula la norma ISO 140-4:1998, y compone la primera parte de la serie ISO 16283 que a partir del año 2016 sustituye también las normas ISO 140-5:1998, ISO 140-7:1998 e ISO 140-14:2004, con la publicación de las partes 2 y 3: aislamiento a ruido de impacto y en fachadas, respectivamente.^[18]

Esta norma define el procedimiento de medida, el campo de aplicación, y los requisitos para obtención y procesamiento de niveles de presión acústica en función de la frecuencia, tomados en un campo acústico excitado por un ruido aleatorio estacionario (ruido rosa o blanco). La ISO 16283-1:2014 difiere de las correspondientes normas de la serie ISO 140 en cuanto a la aplicabilidad en situaciones de campo acústico semidifuso, generado principalmente a bajas frecuencias en recintos de área reducida; presenta un nuevo método de medición a través de un barrido manual con micrófono o sonómetro y desarrolla directrices complementarias existentes previamente en la ISO 140-14:2004.

El objetivo de la serie 16283 es “solventar los vacíos que presentaban las normas ISO 140-4, ISO 140-5 y ISO 140-7, por lo que respecta a la medida del aislamiento en situaciones en las que el campo acústico no es difuso, así como mejorar el procedimiento de medida con el objeto de disminuir la incertidumbre.”^[18]

3.1.1 Campo de aplicación y rango de frecuencias

El procedimiento está destinado a volúmenes de recintos que van desde 10 m³ a 250 m³. Con esta norma, se puede determinar el aislamiento entre recintos en un rango de frecuencias desde 50 Hz a 5kHz, en bandas de tercio de octava.

3.1.2 Altavoces y generación del campo acústico

El campo acústico que se produce para la medición se debe generar con ayuda de al menos dos altavoces, o un mismo altavoz en dos posiciones diferentes, en el recinto emisor. El altavoz deberá ser una fuente de ruido aleatorio omnidireccional, según las exigencias del Anexo A (normativo), preferentemente de ruido rosa o blanco. El contenido espectral de la señal aleatoria

generada en el recinto emisor debe cumplir con una diferencia máxima de 8 dB entre bandas adyacentes de tercio de octava, para frecuencias superiores a 100Hz.

Antes del inicio del ensayo, se puede realizar un chequeo de la señal emitida por la fuente, para verificar el cumplimiento de este requisito. La ecualización de la señal emitida por la fuente podrá ser necesaria para cumplir la linealidad de bandas de frecuencias mínima exigida. “La potencia acústica del altavoz se debe ajustar de manera que el nivel de presión acústica de la señal emitida sea superior al ruido de fondo en el recinto receptor, cuyo valor ideal está por encima de los 15 dB en cada banda de tercio de octava.”^[18]

3.1.3 Micrófonos y obtención de datos

La norma propone tres métodos alternativos para efectuar el muestreo del nivel de presión acústica equivalente en los recintos emisor y receptor:

1) Micrófono fijo sobre trípode o sostenido a pulso:

En esta situación, el tronco del operador debe permanecer alejado del micrófono, a una distancia mínima correspondiente a un brazo. Se deben tomar al menos cinco muestras del nivel de presión equivalente para cada posición de fuente, en puntos distribuidos de manera que el conjunto de posiciones no conforme una retícula regular, o que se establezcan paralelismos respecto a los límites del recinto.

2) Sistema mecanizado con movimiento continuo:

El movimiento realizado con auxilio de un sistema mecanizado (jirafa) debe barrer a una velocidad angular constante, en trayectoria circular de radio mayor que 0,7 m, donde el ángulo de rotación se sitúa entre 250 y 360 grados en relación al eje central fijo. La duración mínima del barrido con este método debe ser de al menos 15 segundos, y se realiza como mínimo una medición por posición de fuente, en casos en los que no se utilicen simultáneamente más de una fuente.

El micrófono con movimiento continuo, que realiza un barrido circular, es preferible en situaciones en las que el técnico mide desde fuera de la sala. Sin embargo, en determinadas situaciones de medición del aislamiento *in situ*, es preferible que el operador esté dentro de la sala para que pueda efectuar una valoración subjetiva de la calidad de la medida, frente a eventuales sucesos sonoros externos que puedan comprometer los resultados obtenidos.

3) Barrido manual:

En el caso de la opción por el barrido manual para la obtención del nivel de presión sonora en el recinto emisor y/o receptor, la ISO 16283-1 define cuatro alternativas de trayectoria – circular, helicoidal, cilíndrica y de tres semicírculos – que se ilustran en la Fig. 3.1. En el apartado 7.5 de la norma, cada una de las trayectorias está definida por un ángulo de rotación y velocidad específicos.

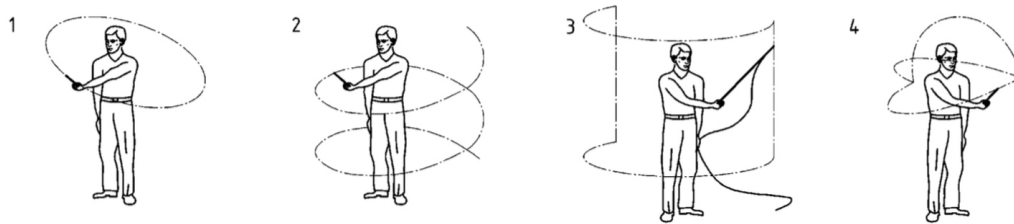


Fig. 3.1: Barrido manual: círculo (1), helicoide (2), cilíndrica (3) y de tres semicírculos (4). ^[18]

Dado que la distribución de los niveles de presión acústica en un recinto no es uniforme, las opciones de barrido manual o de movimiento mecanizado continuo logran, con una sola medida, un promediado espacial más representativo del campo sonoro. Una ventaja del barrido manual *in situ* es la supresión del trípode y la reducción del tiempo de muestro temporal mínimo. Sin embargo, la última versión de esta norma no contempla cuestiones relacionadas con el ruido que eventualmente se puede producir por el movimiento del operador al efectuar las trayectorias descritas. El mayor riesgo de que se produzca ruido con el movimiento del operador puede ser un contrapunto desfavorable al empleo de esta técnica.

No obstante, el cuerpo humano permite aplicar al escaneo manual trayectorias de geometría compleja en tres dimensiones, en comparación con los equipos mecánicos de barrido espacial. Un estudio analítico de la eficacia de los barridos manuales realizado por Hopkins^[17] compara posibles trayectorias y movimientos distintos del operador a partir de un análisis numérico del muestreo espacial en un campo acústico modal, evaluando en cada tipo de trayectoria la cantidad correspondiente de mediciones del nivel de presión sonora en puntos fijos no correlacionados para frecuencias por encima de los 200 Hz, que es la frecuencia de corte aproximada de muchos recintos de vivienda. Las diferentes trayectorias de medición estudiadas se pueden dividir en tres grupos: 1) aquellas en las que el operador camina en el recinto, 2) donde realiza una rotación con el cuerpo desde un punto fijo y 3) trayectorias que no requieren el movimiento del tronco del operador.

A partir de las soluciones numéricas del método de muestreo empleado, se concluye que un barrido manual puede corresponder, como mínimo, a cinco posiciones de micrófono no correlacionadas por encima de los 200 Hz. Las trayectorias que requieren caminar con el micrófono son las más sensibles a la producción de ruido por el operador y en las que resulta más difícil lograr un desplazamiento continuo con una velocidad constante; las trayectorias helicoidal y cilíndrica resultan en una mayor cantidad equivalente de puntos de medición no correlacionados, aunque requieren más espacio libre para que se realice el movimiento correspondiente. En el caso de que se mida en un recinto amueblado, y no se disponga de espacio suficiente para el barrido con rotación del cuerpo del operador, la trayectoria de tres semicírculos con 45 a 60 grados de separación resulta la opción más apropiada, si se compara con las otras tres trayectorias, según la Fig. 3.2:

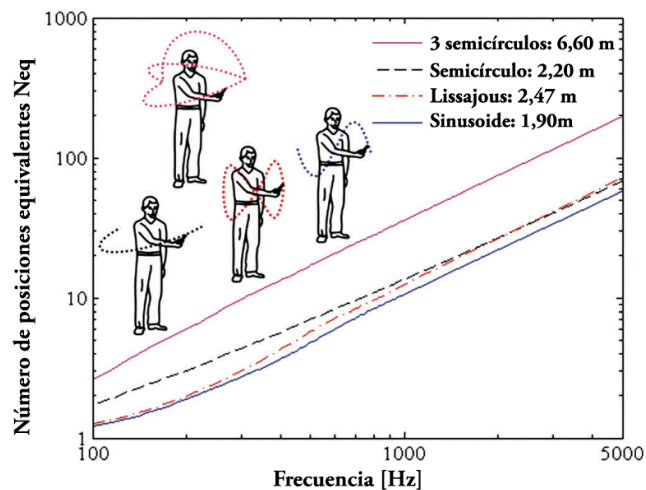


Fig. 3.2: Número de muestras discretas para cuatro diferentes trayectorias tomadas en un punto. ^[17]

3.1.4 Muestreo temporal

La norma determina un promedio temporal mínimo en función del método de muestreo empleado y del rango de frecuencias que se mida. El apartado 7.7.3 de la ISO 16283-1 especifica el tiempo de medición mínimo en cada caso. Si se realiza una medición en bandas de frecuencia entre 50 Hz a 5 kHz, empleando el método de posiciones fijas de micrófono, el tiempo de promedio para cada posición individual debe ser de al menos 15 segundos.

3.1.5 Distancias mínimas para el muestreo espacial

Con el fin de garantizar una reproducibilidad aceptable de la medida de aislamiento, se realiza un muestreo espacial al distribuir diferentes puntos de medición en los recintos emisor y receptor. Un punto de medición debe cumplir ciertas distancias mínimas en relación a las superficies, a las posiciones de altavoz y a los demás puntos de medida. La norma indica una distancia mínima de:

- 0,7 m entre las posiciones de micrófono fijas;
- 1 m entre cualquier posición de micrófono y el cerramiento separador;
- 0,5 m entre cualquier posición de micrófono y los límites del recinto;
- 0,7 m entre cualquier posición del micrófono y el altavoz.

3.1.6 Procedimiento de medición específico a bajas frecuencias

Para el cálculo de la diferencia de niveles a bajas frecuencias (bandas de tercio de octava de 50, 63 y 80 Hz) y en los recintos de volumen igual o inferior a 25 m³, se define un nuevo parámetro denominado *nivel de presión acústica de baja frecuencia promediado energéticamente en un recinto* (L_{LF} , Ec. 3.1), que combina valores del procedimiento de medición por defecto tomados en el rango de 50 Hz a 5 kHz, y niveles de presión sonora medidos en los rincones de los recintos ($L_{Esquina}$). El nivel L_{LF} se define como una estimación del nivel de presión acústica promediado energéticamente en la totalidad del volumen del recinto, medido en bandas de frecuencia:

$$L_{LF} = 10 \log \left[\frac{(2 \cdot 10^{L_p \cdot 0,1}) + 10^{\frac{L_{Esquina}}{10}}}{3} \right] \text{ dB} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

L_{LF} = Nivel de presión acústica de baja frecuencia promediado energéticamente en un recinto [dB];

L_p = Nivel de presión acústica según el procedimiento de medición por defecto [dB];

$L_{Esquina}$ = Nivel de presión acústica en función del promedio de los valores de presión sonora cuadrática más elevados de entre los obtenidos en los rincones, según la Ec. 3.2:

$$L_{Esquina} = 10 \log \left(\frac{p_{Esquina,LS1}^2 + p_{Esquina,LS2}^2 + \dots + p_{Esquina,LSq}^2}{q \cdot p_0^2} \right) \text{ dB} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

$p_{Esquina,LS1}, p_{Esquina,LS2}, \dots, p_{Esquina,LSq}$ = Presiones acústicas más elevadas entre las mediciones tomadas en los rincones correspondientes a la q ésima posición del altavoz [Pa], para cada posición de fuente si se emplea una fuente en diferentes posiciones de excitación;

q = Números de posiciones de altavoz;

p_0 = Presión acústica de referencia [Pa].

Según este método para las bajas frecuencias, se debe medir al menos cuatro rincones utilizando un micrófono de mano fijo, como muestra la Fig. 3.3:

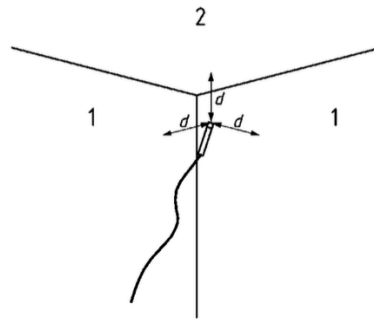


Fig. 3.3: Medición en un rincón, donde la distancia d debe estar entre 0,3 y 0,4 m en relación a las paredes (1) y techo (2). ^[18]

La norma justifica la necesidad de aplicación de este método de medición del aislamiento a bajas frecuencias en recintos con volumen inferior a 25 m³ con base de que el campo sonoro modal en un recinto pequeño presenta grandes variaciones espaciales de nivel de presión acústica a estas frecuencias, como se ha comentado anteriormente en el Capítulo 2. El hecho de extender el rango de medición a bajas frecuencias, presentando los resultados en bandas de tercio de octava de 50 Hz a 5 kHz, justifica la especificidad del método. Estudios previos a la edición de esta norma^[12,13] comprueban que la medición en los rincones mejora la repetibilidad y la reproducibilidad de los niveles medidos.

En el estudio comparativo de los métodos de promedio espacial descritos en la ISO 16283-1 realizado por Simmons^[13], en el que se incluye el muestreo con el método específico de bajas frecuencias, se comparan los resultados con una referencia obtenida a partir de la medición de una malla de puntos de 0,7 x 0,7 m en los recintos, emisor y receptor, en dos alturas diferentes (1,7 y 0,7 m). En este estudio se ha demostrado la eficacia del método de medición en los rincones

al aumentar el nivel promedio del muestreo y al disminuir la desviación típica de los resultados, por debajo de los 100 Hz.

El procedimiento de medición y el procesado de los resultados para el cálculo del aislamiento a bajas frecuencias viene detallado en el apartado 8 de la norma UNE-EN ISO 16283-1^[18].

3.1.7 Corrección por ruido de fondo

Para garantizar que el nivel de presión sonora registrado en el recinto receptor cuando la fuente está encendida se corresponde efectivamente con el ruido emitido por la fuente, es imprescindible medir el ruido de fondo en el recinto receptor. Por ello, se debe medir previamente el nivel de ruido de fondo (L_b), incluso en las mediciones necesarias para determinar el $L_{Esquina}$, específico para las bajas frecuencias.

La corrección por ruido de fondo se aplica al procedimiento por defecto y de bajas frecuencias, cuando la diferencia entre el nivel de presión acústica de la señal aleatoria y el nivel del ruido de fondo sea igual o inferior a 10 dB, en cualquiera de las bandas de tercio de octava. Los niveles corregidos se calculan de la siguiente manera:

- a) Si la relación señal-ruido de fondo en el recinto receptor es superior a 6 dB e inferior a 10 dB, se aplica la corrección según la Ec. 3.3:

$$L = 10 \log \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right) \text{ dB} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:

L = Nivel de presión acústica de la señal corregido por ruido de fondo [dB];

L_{sb} = Nivel de presión acústica de la señal y del ruido de fondo combinados [dB];

L_b = Nivel de presión acústica del ruido de fondo [dB].

- b) Si la relación señal-ruido de fondo en el recinto receptor es inferior o igual a 6 dB, se usará una corrección de 1,3 dB, y se indicará en el informe el empleo del término corrector.

3.1.8 Cálculo de la diferencia de niveles de presión acústica entre recintos

Para cada posición de altavoz se realiza un promedio energético de las muestras tomadas en los diferentes puntos individuales de medición, según el muestreo espacial establecido, en el recinto emisor y receptor, de acuerdo con la Ec. 3.4:

$$L = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right) \text{ dB} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde:

L = Promedio energético del nivel de presión acústica, para la posición q de altavoz [dB];

n = Número de puntos medidos para la posición q de altavoz;

L_i = Nivel de presión acústica de un punto de medición i .

A partir del cálculo de los niveles promediados, se determina la diferencia de niveles de presión acústica entre recinto emisor y receptor para cada posición de fuente, según la resta de la Ec. 3.5:

$$D = L_1 - L_2 \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde:

D = Diferencia de niveles de presión acústica entre dos recintos, en relación a la posición q de altavoz [dB];

L_1 = Promedio energético del nivel de presión acústica en el recinto emisor, para la posición q de altavoz;

L_2 = Promedio energético del nivel de presión acústica en recinto receptor, para la posición q de altavoz.

La diferencia de niveles de presión acústica final entre recintos será el promedio energético de los dos espectros de D , obtenidos para cada posición de fuente del recinto emisor.

3.2 Medición del Tiempo de Reverberación en el Recinto Receptor

Al medir el aislamiento acústico de un cerramiento, independientemente del método que se emplee, es imprescindible medir correctamente el tiempo de reverberación en el recinto receptor, para expresar el descriptor de aislamiento “normalizado” correspondiente. En la normativa española, el parámetro que se emplea para expresar el nivel de aislamiento medido *in situ* es la *Diferencia de nivel estandarizado* (D_{nT}), que utiliza el tiempo de reverberación como magnitud “normalizadora”, de acuerdo con la Ec. 3.6:

$$D_{nT} = D + 10 \log \frac{TR}{T_0} \quad \text{Ec. 3.6}$$

La norma internacional^[18] establece un tiempo de reverberación de referencia (T_0) de 0,5s independientemente del volumen y banda de frecuencia. Este valor se considera razonable en recintos de vivienda amueblados. Dado que la “normalización” del descriptor D_{nT} se efectúa según el tiempo de reverberación, en realidad el valor numérico de D_{nT} depende de la dirección de la transmisión sonora y de los volúmenes de los recintos bajo ensayo. El valor de D_{nT} será algo más elevado cuando el recinto emisor es más pequeño. Puesto que al realizar un ensayo conviene ponerse en la situación menos favorable en cuanto al cumplimiento de exigencias de aislamiento y al confort del usuario, la norma requiere que el recinto emisor sea el de volumen más grande para que resulte un valor mínimo de aislamiento a ruido aéreo entre ambos recintos.

Para la medición del tiempo de reverberación, la norma ISO 16283-1 describe dos métodos diferentes: 1) el método de ruido interrumpido, en el que se mide la caída del nivel de presión sonora en cada banda de frecuencia, a partir de la interrupción de la emisión de una fuente que genera un campo acústico estabilizado; y 2) el método de la respuesta al impulso integrada, desarrollado por M. R. Schroeder en la década de 1960 y descrita en su artículo publicado en 1965^[19]. Los requisitos de los ensayos de tiempo de reverberación se detallan en la serie ISO 3382. Además de que la medida del tiempo de reverberación es parte del procedimiento de medición del aislamiento en edificios, la revisión teórica que se realiza a continuación da un especial énfasis al tema debido a la importancia que tiene en la introducción a los nuevos métodos, que se presentarán en los capítulos 4 y 5.

3.2.1 Método de la fuente interrumpida

El tiempo de reverberación TR corresponde al tiempo necesario para que el nivel de presión sonora disminuya 60 dB. Otra forma de definirlo, es el tiempo que tarda la energía en disminuir a una millonésima parte del valor inicial, expresado en segundos. En general, como no siempre es posible medir el decaimiento de 60 dB frente a la interferencia del ruido de fondo y de otros errores relacionados al sistema de medición y detección, se calcula el tiempo de reverberación a partir de una regresión lineal de un tiempo de medida acotado, que se inicia normalmente a 5 dB por debajo del valor inicial de medición, y termina a $x + 5$ dB del nivel de decaimiento, siendo x el nivel de referencia que se elige de acuerdo con la ISO 354 e ISO 3382.^[9,20]

El procedimiento de medición se inicia con la excitación del campo acústico con una fuente de ruido aleatorio (ruido blanco o rosa), que una vez estabilizado en la sala, se apaga. Se inicia entonces la medición del decaimiento del nivel de presión sonora en función del tiempo. Al medir un decaimiento menor de 60 dB, debido a la relación señal-ruido de fondo, se extrapola el intervalo útil de la medida (Fig. 3.4) para determinar el tiempo correspondiente al tiempo de reverberación.^[7]

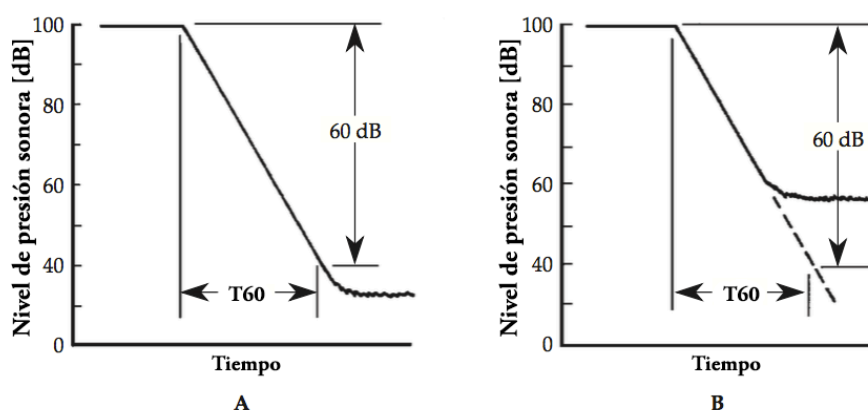


Fig. 3.4: Tiempo del decaimiento del nivel de presión sonora en función del nivel de potencia de la fuente y del nivel de ruido de fondo. (A) Difícilmente se puede medir un decaimiento de 60 dB. (B) La pendiente de un tiempo de medición menor se extrapola para determinar el tiempo de reverberación.^[7]

La curva de decaimiento obtenida no es suave debido a las fluctuaciones aleatorias del nivel de presión sonora, que derivan de la naturaleza aleatoria de la señal utilizada. Cuando el ruido de fondo empieza a influir en el decaimiento, la curva ya no representa el comportamiento del sonido que se necesita para determinar el tiempo de reverberación del recinto.^[9] Cuanto más suave sea la curva, menos error se produce en la determinación del inicio y fin del intervalo que se emplea en la regresión lineal.

Las curvas de decaimiento por banda de frecuencia varían de acuerdo con el punto que se mide, siendo por lo tanto necesario calcular un valor promedio del TR . Para obtener medidas que posibiliten una estimación adecuada, se deben tener en cuenta las características físicas del recinto, el procedimiento de medida adoptado, el procesado que se utiliza para el tratamiento de la señal y el método de evaluación de la curva de decaimiento.^[9]

En una medida del tiempo de reverberación, se excluye de la medición el tiempo de decrecimiento del sonido directo en el campo sonoro en que se mide (Fig. 3.5). Una vez que el comportamiento acústico que se busca evaluar en una sala es el del campo reverberante, la parte inicial de la curva no aporta información útil al cálculo del TR , y se excluye el intervalo hasta la llegada de la primera reflexión, cuando el decaimiento empieza a presentar un comportamiento exponencial.

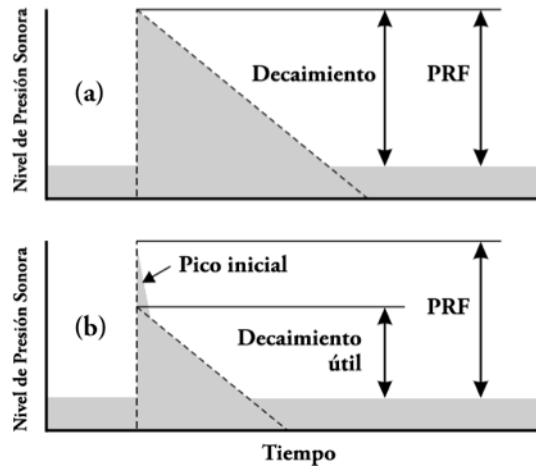


Fig. 3.5: Diagrama del decaimiento teórico (a) y real (b) del tiempo de reverberación en una banda de frecuencia. En una medida real, la distancia PRF (pico-ruido de fondo) no representa el comportamiento del campo acústico difuso debido que el pico inicial de la curva correspondiente al decaimiento del sonido directo en los primeros milisegundos de medición.^[20]

Para determinar este intervalo inicial, se puede estimar el tiempo de propagación del sonido correspondiente al camino libre promedio del recinto^[7,9], que es la distancia aproximada entre dos reflexiones sucesivas en una sala, y se estima de acuerdo con la Ec. 3.7:

$$\bar{l} = \frac{4V}{S} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Donde:

\bar{l} = Camino libre promedio [m]

V = Volumen de la sala [m³]

S = Superficie de la sala [m²]

Se considera que la distancia desde la fuente hasta el punto de reflexión sobre la superficie, y del micrófono hasta el mismo punto de reflexión son iguales a la mitad del camino libre promedio \bar{l} . En un recinto con un volumen de aproximadamente 50m³, a una temperatura de 20°C, el tiempo que tarda la propagación del sonido en una distancia correspondiente al camino libre promedio es de aproximadamente 7 ms; en un recinto de 200 m³, este tiempo es de aproximadamente 11 ms. En la mayor parte de los recintos, el inicio del intervalo útil de la curva, a 5 dB por debajo del valor inicial, es suficiente para excluir la interferencia del campo directo en el cálculo del TR .^[9]

El valor obtenido de la medición del tiempo de reverberación no es solamente útil para el cálculo del aislamiento acústico entre recintos y de elementos de la edificación, sino que también se utiliza para medir el coeficiente de absorción de los materiales de las superficies, para

determinar el término de corrección de ensayos de estimación del nivel de potencia sonora de máquinas, o incluso en evaluaciones objetivas de la inteligibilidad de palabra en una sala. Todas estas aplicaciones se excluyen del campo de estudio en este trabajo.

3.2.2 Requisitos de la ISO 3382-2

La norma ISO 16283-1 hace referencia al método normalizado descrito en la norma ISO 3382-2, para mediciones de tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Esta última norma permite la aplicación de tres niveles de exactitud de la medición del *TR*: control, ingeniería y precisión. La diferencia principal entre los tres niveles es el número de posiciones de medición empleadas para realizar el promedio espacial. Para medidas de tiempo de reverberación requeridas en la norma ISO 16283-1, se precisa un nivel de exactitud de ingeniería, que supone una precisión nominal superior al 5% en bandas de octava y superior al 10% en bandas de un tercio de octava.^[21]

Sobre la medición del tiempo de reverberación en salas, la norma define una preferencia por los rangos de evaluación de *T*₂₀ y *T*₃₀ (medidas del *TR* a partir del decrecimiento del nivel de presión sonora en los primeros 20 y 30 s, respectivamente). Se justifica que la evaluación subjetiva de la reverberación está relacionada con la primera parte del decrecimiento del sonido y que, dependiendo de la banda de frecuencia, en algunos casos el ruido de fondo puede impedir una relación señal-ruido elevada. Para determinar el *T*₂₀, el rango de las curvas de decrecimiento se extiende desde 5 dB a 25 dB, por debajo del valor inicial, también denominado régimen estacionario del ruido aleatorio producido por la fuente. Si se determina el *T*₃₀, el rango de evaluación es de 5 dB a 35 dB.^[21]

Al excitar la sala, conviene colocar al menos una posición de la fuente en una esquina del recinto. Al medir, las posiciones de micrófono deben estar preferiblemente separadas al menos media longitud de onda: en el rango de frecuencias habitual de medición (100 a 5000 Hz), esta distancia corresponde a aproximadamente 2 m. Tanto la fuente como el micrófono deben ser omnidireccionales, y el tamaño del micrófono debería ser lo más pequeño posible, con un diámetro máximo de diafragma de 14 mm.

3.2.3 Decaimiento modal

En ciertas ocasiones los modos de una sala no decaen a una misma velocidad, como ocurre en situaciones en las que los materiales de las superficies no están distribuidos de manera homogénea. En estos casos, el decaimiento de una banda de frecuencia puede presentar una doble curvatura: puede ocurrir que el valor inicial del decaimiento corresponda a un único modo que aporta mucha energía sonora en relación a los demás, y encuentre en el recinto mucha absorción a esta frecuencia.

Un ejemplo típico ocurre cuando se tiene un techo muy absorbente en el recinto contrastando con una superficie de paredes y suelo con bajo índice de absorción. Al medir el *TR* en bandas de altas frecuencias, el decaimiento en su parte inicial – que se determina predominantemente por los modos oblicuos de la sala – puede ser más rápido en relación a la parte final, dado que los demás modos decrecen a una velocidad diferente. Esto genera una doble curvatura y dificulta la interpretación del comportamiento del sonido en el recinto.^[7,9] En el Anexo

B de la norma ISO 3382-2^[21] se presentan dos indicadores para la evaluación de las curvas de decrecimiento no lineales.

Una característica de los modos propios de una sala es su ancho de banda, que puede ser calculado de acuerdo con la Ec. 3.8:

$$\text{Ancho de banda} = f_2 - f_1 = \frac{2,2}{TR} \quad \text{Ec. 3.8}$$

El ancho de banda de un modo es inversamente proporcional al tiempo de reverberación. Cuanto más seco es el recinto acústicamente, mayor es el ancho de banda de un modo. Esto implica que las medidas en recintos con bajo tiempo de reverberación pueden presentar modos adyacentes que tienden a sobreponerse. En estos casos, se observa que al energizarse un modo de resonancia, la superposición fuerza la excitación de los modos adyacentes, un fenómeno que resulta deseable al medir bandas de frecuencia que contienen pocos modos propios del recinto.^[7]

3.2.4 Medición del TR a bajas frecuencias

En cada banda de frecuencia, la curva de decaimiento está determinada por el decaimiento individual de cada uno de los modos propios de la sala que contiene esta banda, y por la interacción entre estos modos. A partir del cálculo de la densidad modal asociada a cada banda de tercio de octava en una recinto típico de vivienda, se concluye que el problema asociado a la cantidad de modos en una banda es más significativo en las bandas de bajas frecuencias. En este sentido, no es del todo correcto analizar cada banda de frecuencia por separado, puesto que el decaimiento de un modo influye en los modos adyacentes, y puede afectar a una banda de frecuencia distinta.

En un recinto, cuanto más difuso es el campo sonoro, más suave es la caída de una medición de tiempo de reverberación. En un recinto con ecos, con pocos modos propios o con modos propios mal distribuidos en una banda de frecuencia que se quiere medir, el decrecimiento del nivel de presión sonora no genera una curva uniforme. A bajas frecuencias, los modos propios de una sala pequeña representan una dificultad peculiar en la caracterización del tiempo de reverberación. Esto se debe a que, en bajas frecuencias, los modos propios de la sala pueden estar distribuidos de manera poco uniforme, fuera de que el tiempo de decrecimiento puede variar de un modo a otro, como ya se ha explicitado en el apartado anterior.

En la Fig. 3.6 se puede apreciar el suavizado que se produce debido a la densidad modal, que tiende a aumentar en las bandas de medias y altas frecuencias:

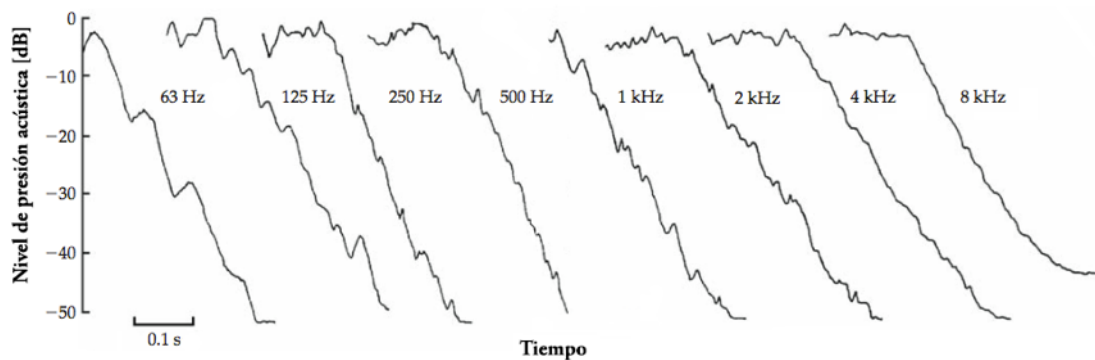


Fig. 3.6: *Decaimiento en bandas de octava del nivel de presión acústica en un recinto pequeño, de volumen igual a 82,7 m³. Las fluctuaciones debidas a la interferencia modal son significativas en las bajas frecuencias, cuyas bandas contienen pocos modos de resonancia de la sala.^[7]*

En un estudio sobre la dispersión de las medidas de TR tomadas en un mismo punto de una cámara reverberante, Davy^[22] concluye que la principal causa de incertidumbre en esta situación no es la excitación aleatoria de las distintas frecuencias con niveles de decaimiento diferentes, excepto en las medidas a bajas frecuencias. La baja densidad de modos propios en estas bandas de frecuencias, y el alto porcentaje de modos axiales y tangenciales – que tienen un decaimiento significativamente más pronunciado comparados con los modos oblicuos – son características que pueden comprometer la calidad de los resultados en términos de incertidumbre asociada a la medida. Desde el punto de vista de la estimación teórica de la dispersión de los resultados, el autor aplica a las bandas por debajo de los 100 Hz un factor de corrección en función de la superposición modal estadística.

Davy^[22] también investiga el efecto de la posición de las fuentes sonoras sobre la dispersión en las mediciones de TR. Concluye que la dispersión de las medidas de TR en función de la posición del altavoz es similar a la dispersión de la posición de micrófono, en el rango desde 100 a 350 Hz (medias frecuencias). Esta constatación confirma la necesidad del empleo de por lo menos dos posiciones de altavoz en ensayos de tiempo de reverberación, de acuerdo con el método normalizado por la ISO, en especial para las frecuencias por debajo de los 300 Hz.

En el Anexo C se describen otros errores asociados a la medida del tiempo de reverberación en recintos: el ruido propio generado por el filtro paso banda y el error por distorsión de fase.

4. MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

En este capítulo se introduce el método de la función de transferencia para mediciones de acústica, que se basa en la obtención de la respuesta al impulso del recinto, preferiblemente con la excitación de señales impulsivas de alta calidad o señales deterministas – como la señal MLS y el barrido de tonos sinusoidal – que se definen y se describen a continuación. A partir de la definición teórica de la obtención de la respuesta al impulso de un recinto (RIR), se analiza la técnica de medición del tiempo de reverberación con el método de Schroeder, y luego las principales características de las señales deterministas que se utilizan en mediciones de acústica. A partir de los conceptos de este método aplicado a la medición del tiempo de reverberación, es posible comprender su aplicación en la determinación de la diferencia de niveles con el método de la función de transferencia, según los criterios definidos en la norma ISO 18233.

4.1 Método de la Función de Transferencia en Mediciones de Aislamiento: ISO 18233

En los últimos años, la mejora de rendimiento y la reducción de tamaño del *hardware* dedicado al procesado de la señal han posibilitado el desarrollo de potentes equipos portátiles dedicados al tratamiento de la señal sonora. Ello ha permitido la aplicación *in situ* de técnicas de medición acústica de fenómenos de propagación y transmisión. El método de la función de transferencia aplicado a mediciones de aislamiento acústico y normalizado por la ISO 18233 presenta como principal ventaja, si se compara con la técnica de medición clásica con ruido aleatorio, la extensión del rango dinámico de medición y el consecuente aumento de la relación señal-ruido en el recinto receptor.^[4]

En mediciones de aislamiento acústico entre recintos realizados con el método clásico, normalizado por la ISO 16283-1, es común enfrentarse a relaciones pobres de señal-ruido de fondo en el recinto receptor.^[1,2] Esta situación ocurre principalmente cuando la fuente dodecaédrica convencional que se utiliza no emite suficiente energía acústica a bajas frecuencias (50, 63 y 80 Hz) o también a altas frecuencias, donde el aislamiento a ruido aéreo de las particiones es mayor.

Se puede conseguir un refuerzo de la radiación sonora a bajas frecuencia en ensayos con señales acústicas aleatorias a través de la utilización de una caja resonadora en la base del altavoz (*bass reflex*). Sin embargo, hoy en día ya no resulta difícil la aplicación de la nueva técnica de medición del tiempo de reverberación y diferencia de niveles entre recintos que emplea señales deterministas generadas a través del ordenador. Con esta técnica, se tiene un mayor control de las características de la señal generada, mejor precisión en el ajuste de la potencia emitida y, por lo tanto, niveles de precisión más altos de las mediciones si se compara a los métodos basados en señales estocásticas y espectro de potencia cruzado.^[14] En este apartado se presenta primeramente el concepto de la obtención de la respuesta impulsiva de un recinto utilizando señales impulsivas, su aplicación en la obtención del tiempo de reverberación a través de método de Schroeder, la definición y aplicación de señales deterministas para la obtención de la respuesta impulsiva de una sala, y, por último, la aplicación de la técnica para medición y cálculo del aislamiento a ruido aéreo entre recintos.

4.1.1 Generalidades

La norma internacional ISO 18233 presenta el método de mediciones acústicas basado en la determinación de la función de transferencia o, tratándose de un recinto, de la respuesta al impulso de una sala usando como fuente excitadora señales deterministas en vez de señales aleatorias. Esta norma recomienda el uso de la señal MLS (*Maximum-Length Sequences*) o del barrido sinusoidal (*Sine Sweep*). La norma establece qué magnitudes se deben medir, las condiciones ambientales necesarias para el ensayo y el muestreo temporal y espacial de las medidas. También especifica los requisitos para cada tipo de excitación determinista y sus criterios de procesamiento de señal.

La elección de puntos de medición, evaluación de resultados, las condiciones de directividad de emisión del altavoz y el número de posiciones de fuente de excitación deben seguir las indicaciones del método clásico descrito en la serie ISO 16283. Con respecto a los cambios de posición de los micrófonos – o muestreo espacial de la sala – existirá dispersión de los valores medidos al igual que en el método clásico. La calidad de los resultados obtenidos con la aplicación de esta norma dependerá de la observancia de los requisitos para la selección de la señal de excitación, del procesamiento de la señal y control del ambiente físico de ensayo que influye en los requisitos de linealidad e invariabilidad temporal del sistema.^[2,4]

4.1.2 Requisitos del sistema bajo ensayo

El método de la función de transferencia se basa en la teoría de los sistemas lineales para establecer una relación entre la excitación acústica y la respuesta de un sistema. El método de procesamiento considera lineal e invariante en el tiempo (LTI) la propagación sonora en el interior de una sala como también la transmisión entre dos recintos. La condición de linealidad significa que el comportamiento del sistema es invariante frente a los cambios en el nivel de energía de excitación, y que la invariancia no se altera en función del tiempo.^[14]

Por lo tanto, el método puede presentar una mayor sensibilidad a las variaciones físicas del sistema, al cambio de las condiciones ambientales en el recinto (temperatura, velocidad del aire), si se compara con el método clásico.^[5] Uno de los objetivos de la ISO 18233 es establecer directrices específicas para disminuir el riesgo de error en la aplicación del método.

4.2 Determinación de la Respuesta al Impulso del Recinto (RIR)

Desde hace muchas décadas los especialistas en medidas acústicas emplean la medición de la respuesta impulsiva para la investigación en acústica de salas. En este ámbito, la respuesta impulsiva del recinto (RIR) permite evaluar objetivamente la calidad de la percepción aural a partir del cálculo de diferentes parámetros acústicos, relacionados con el comportamiento del sonido en función del tiempo y de la frecuencia.

A partir de una interpretación teórica del concepto, la respuesta al impulso es la respuesta física de un sistema a una delta de Dirac $\delta(t)$. Dado que la $\delta(t)$ es un impulso infinitamente estrecho en función del tiempo y de amplitud infinita, se trata de un objeto matemático que no se puede reproducir en la práctica. Las señales acústicas que mejor se aproximan a sus

características son un disparo de pistola, una explosión de globos, dar palmas, o explosiones de ruido generado a través de altavoces.^[9]

Cuando se excita un sistema LTI con una función $\delta(t)$, se obtiene la respuesta al impulso $h(t)$ de este sistema. Un sistema acústico se define en este caso como el espacio o la estructura bajo ensayo y toda la cadena de medida que se utiliza. Para un sistema LTI, la respuesta al impulso $h(t)$ describe la totalidad del sistema; por tanto se puede calcular la señal de salida $y(t)$ para cualquier señal de entrada $x(t)$ conocida, a través de la integral de convolución:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad \text{Ec. 4.1}$$

En mediciones de acústica, para que no se comprometa la condición de un sistema LTI, no se debe mover la fuente de excitación o los micrófonos durante el tiempo de medición de la respuesta impulsiva. El movimiento del aire o los cambios de velocidad del sonido en función de la temperatura ambiente pueden invalidar esta condición de invariabilidad del sistema.

La respuesta impulsiva de un recinto (RIR) en función del tiempo es generalmente una señal oscilante con un gran número de periodos, como la que se muestra en la Fig. 4.1. La envolvente de la señal es irregular, y tiene un tiempo de ataque rápido y un decaimiento exponencial. La RIR puede aportar información acerca del tiempo que el sonido reverbera en el espacio, y también de la distribución de los niveles de presión sonora en el tiempo.^[23]

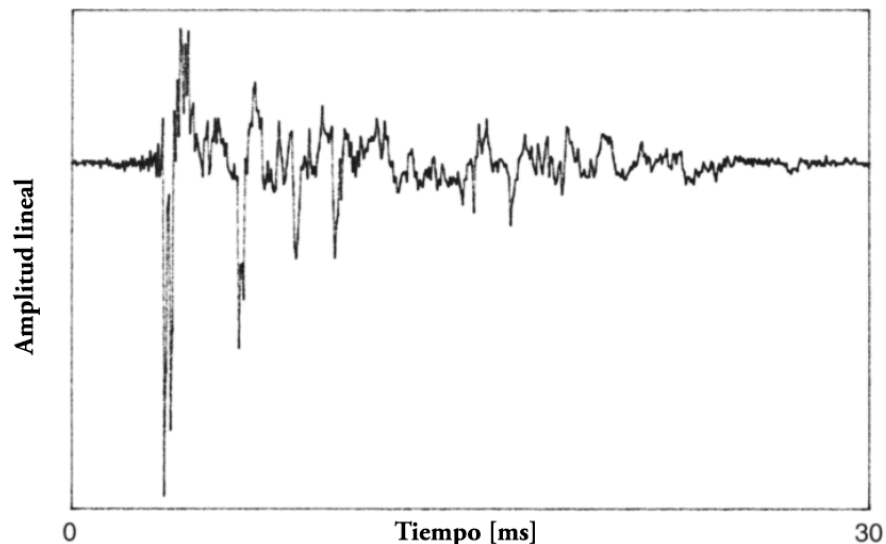


Fig. 4.1: Respuesta al impulso de un recinto (RIR).^[6]

La respuesta al impulso en función de la frecuencia puede indicar los modos de resonancia de una sala, que se identifican en los picos de amplitud más elevada. En la Fig. 4.2, se presenta la respuesta al impulso en frecuencia en el rango de 0 Hz a 5 kHz, correspondiente a la RIR de la Fig. 4.1. El gráfico de fases muestra oscilaciones rápidas e irregulares próximas a las frecuencias de resonancia, que contrastan con el patrón de diente de sierra de las regiones del espectro donde el comportamiento modal de la sala no predomina.^[6]

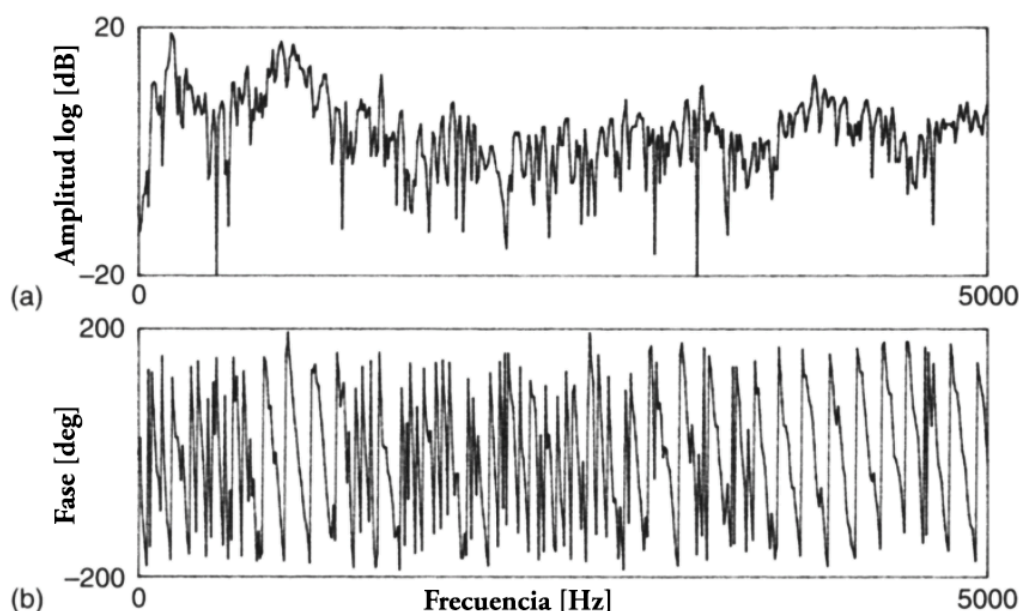


Fig. 4.2: *Respuesta al impulso de un recinto en función de la frecuencia.*^[6]

4.3 Tiempo de Reverberación por el Método de Schroeder

Como se ha comentado, el método de la fuente interrumpida descrito en el apartado 3.2.1, para medidas de tiempo de reverberación, tiene la precisión limitada por fluctuaciones aleatorias en las curvas de decaimiento. Tales limitaciones resultan de interferencias entre los modos propios de diferentes frecuencias, y dependen – entre otros factores – de las amplitudes iniciales y del ángulo de fase de los modos propios en el momento en que la fuente de ruido aleatorio se apaga.^[19] La imprecisión de la medida de TR debido a las fluctuaciones aleatorias en las curvas de decaimiento queda salvada empleando el método de la respuesta al impulso, como se explica a continuación.

El método de la respuesta al impulso integrada desarrollada por M. R. Schroeder realiza un procesamiento de la señal de la respuesta al impulso utilizando una integración invertida en el tiempo. El procesamiento resulta en la misma curva de decaimiento que se obtendría al promediar infinitas curvas medidas en el mismo punto de la sala, con el método de la fuente interrumpida, sin la interferencia de las fluctuaciones aleatorias, lo que aumenta la precisión del método de cálculo. Su implementación requiere que se realice una grabación de la respuesta al impulso y se invierta la señal obtenida, para que el analizador la eleve al cuadrado e integre la función, de acuerdo con el esquema comparativo de la Fig. 4.3. El tiempo de integración es necesariamente finito, puesto que la cola de la curva de decaimiento termina en el nivel correspondiente al del ruido de fondo de la sala.^[9,23]

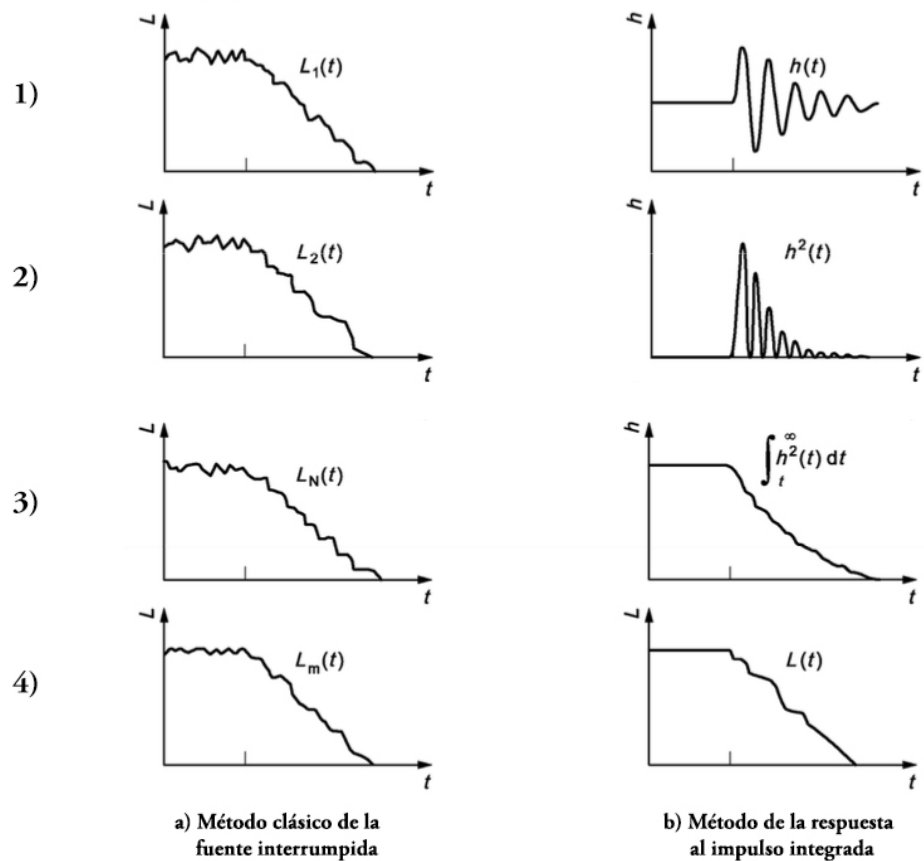


Fig. 4.3: Comparación entre el método clásico y de la función de transferencia, mediante la medición de la RIR, para obtención del decaimiento sonoro en ensayos de tiempo de reverberación, donde L es el nivel de ruido, h la respuesta impulsiva y t la duración.^[4]

La fuente impulsiva que se emplea para la excitación del sistema puede ser un disparo de pistola de fogeo, chispas eléctricas, explosiones de globos, etc. En recintos de gran volumen, se pueden utilizar disparos de cañón para proporcionar energía acústica de excitación adecuada, principalmente a bajas frecuencias.^[7] La fuente impulsiva no puede ser reverberante en sí misma, y debe ser capaz de producir un nivel de presión acústica pico suficiente para garantizar una curva de decrecimiento que empiece, al menos, a 35 dB por encima del ruido de fondo en la banda de frecuencia correspondiente en el caso de que se mida el T_{20} , y a 45 dB si se mide el T_{30} .^[21] El decaimiento suave que resulta de este método aumenta la precisión de la medida del tiempo de reverberación al facilitar la detección de decaimientos no exponenciales, en escala logarítmica.^[19]

Se debe tener en cuenta que el método de Schroeder para medición del tiempo de reverberación a través de la respuesta al impulso integrada posibilita solucionar el error relacionado al suavizado que se produce por múltiples promedios. El error relacionado al filtro paso banda del sistema (Anexo C.1) es una limitación inherente a ambos métodos de medición.^[24]

4.4 Aplicación de Señales Deterministas en la Medición de la Respuesta al Impulso

Para la obtención de una RIR con bajo nivel de error, es preferible medir la respuesta al impulso con una señal determinista empleando un altavoz omnidireccional que con un disparo.

De esta forma se puede tener un control suficiente del contenido espectral y del nivel de potencia de la excitación. Los elementos de *hardware* de procesamiento de señal disponibles hoy permiten obtener, con relativa facilidad, la respuesta al impulso entre dos puntos de un campo acústico, o bien entre recintos adyacentes, para la medición de aislamiento a ruido aéreo. Con estas respuestas al impulso, es posible obtener la diferencia de niveles D , requerida en la normativa internacional para expresar los diferentes índices de aislamiento.^[25]

Los métodos de medida del aislamiento acústico que utilizan señales de excitación deterministas como MLS o el barrido de tonos sinusoidal aumentan considerablemente la relación señal-ruido en las mediciones realizadas en el recinto receptor^[4]. Dada la propiedad determinística de la señal, se garantiza una excelente repetibilidad de excitación en mediciones con un canal de entrada, cuando se mide primero en el recinto emisor y luego en el recinto receptor. Si se opta por utilizar dos canales de entrada, se debe tener en cuenta la posible diferencia de sensibilidad y respuesta en frecuencia entre ambos. Es necesario por tanto tomar ciertas precauciones adicionales a la hora de realizar medidas con dos canales de entrada. Massarani et al.^[26] describen dos métodos de calibración de la cadena de medida en este caso.

4.4.1 MLS (*Maximum-Length Sequences*)

Maximum-length sequences (MLS) es una señal pseudoaleatoria que se genera a partir de secuencias de valores enteros a_k . En el caso de secuencias binarias, estos valores se limitan a dos números opuestos, por ejemplo 1 y -1. La señal se genera por n -ésimos registros de desplazamiento en la totalidad del periodo, y su característica más importante es que la transformada de Fourier en tiempo discreto (DFT) tiene la misma magnitud para todas las frecuencias. Siendo así, su espectro corresponde al de una señal impulsiva.^[27]

Aunque las excitaciones deterministas son generalmente más efectivas en la supresión del ruido parásito que en el método clásico, y alcanzan una relación señal-ruido que puede superar los 30 dB, el uso de altavoces introduce generalmente una distorsión no lineal en el sistema. La distorsión debida al altavoz aumenta con el nivel de excitación e infringe el requisito de linealidad que exige el método de la función de transferencia. Al medir con una señal MLS, se debe tener en cuenta este problema y tantear diferentes niveles de excitación hasta obtener la relación señal-ruido adecuada, con la menor distorsión armónica posible.

Las respuestas impulsivas estarán acompañadas por un ruido no deseado procedente de fuentes extrañas o aún de los propios instrumentos de medición. Este ruido parásito se puede agravar si no se cumplen los requisitos de linealidad y de invariabilidad temporal, y su contribución aumenta con el alargamiento del periodo de integración. La norma ISO 18233 recomienda un límite superior de integración t_1 (Ec. 4.2) en función del tiempo de reverberación en el recinto receptor para cada banda de frecuencia:

$$t_1 \geq \frac{TR}{3} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde t_1 es el límite superior de integración para cada banda de frecuencia del tiempo de reverberación TR .

Aunque la medición con señal MLS es común en la ingeniería acústica, presenta algunas desventajas cuando se aplica en acústica de salas y medidas de aislamiento. Además de su alta

vulnerabilidad a la distorsión armónica, la señal corresponde en frecuencia al espectro del ruido blanco, que no acentúa la emisión de energía acústica en las bajas frecuencias. Por otro lado, la técnica de medición que emplea el barrido sinusoidal (*sine sweep*) no es susceptible a las distorsiones no lineales en la medición, y se la prefiere a la técnica que emplea la señal MLS, en mediciones de acústica arquitectónica^[28,29].

4.4.2 Barrido sinusoidal (*Sine sweep*)

El método de barrido sinusoidal se describe en el anexo B de la norma ISO 18233; su ventaja principal en mediciones de acústica de salas es permitir la eliminación de fenómenos parásitos en el resultado, producidos por la distorsión armónica del altavoz. Este tipo de señal de excitación se distribuye sobre un periodo para aumentar la energía total radiada en cada frecuencia, que varía a cada instante del barrido de periodo T , y se puede interpretar como un “impulso sonoro estirado en el tiempo”^[14]. El uso del barrido de tonos sinusoidal permite llevar el rango dinámico al máximo determinado por las características físicas de la cadena de medida. Ello permite obtener una relación señal-ruido superior a la que se obtiene con el método basado en MLS.^[21]

El barrido sinusoidal es una señal en la que la frecuencia varía continuamente en el tiempo, de manera lineal o exponencial, en un determinado rango de frecuencias y periodo de barrido. La Fig. 4.4 ejemplifica la variación lineal de un barrido sinusoidal en el tiempo.^[29]

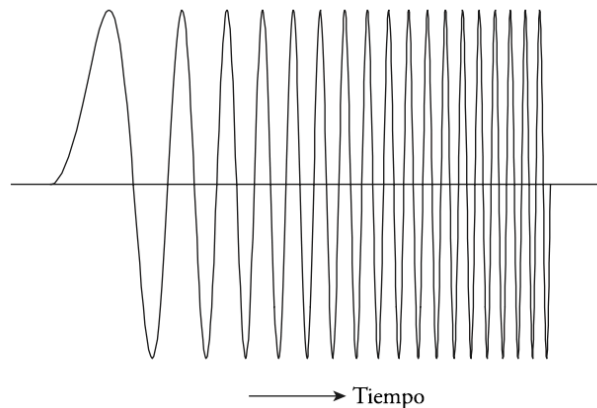


Fig. 4.4: Barrido sinusoidal (*Sine Sweep Signal*).^[23]

El ejemplo más simple de este tipo de señal es el barrido lineal:

$$s(t) = A \sin(bt^2) \quad \text{Ec. 4.3}$$

Cuya frecuencia instantánea es:

$$f(t) = \frac{1}{\pi} bt \quad \text{Ec. 4.4}$$

Y donde la constante b (Ec. 4.5) se puede determinar a partir de la frecuencia inicial f_1 y final f_2 de barrido, de periodo t_s .

$$b = \pi \frac{f_2 - f_1}{t_s} \quad \text{Ec. 4.5}$$

De la misma manera, también se puede emplear el barrido sinusoidal exponencial:

$$s(t) = A \sin[\exp(bt)] \quad \text{Ec. 4.6}$$

Cuya frecuencia instantánea es:

$$f(t) = b \cdot \exp(bt) \quad \text{Ec. 4.7}$$

El espectro del barrido sinusoidal exponencial tiene un decaimiento proporcional a $1/f$, que corresponde a 3 dB por octava (Fig. 4.5). Una de sus ventajas es posibilitar mayor énfasis en el rango a bajas frecuencias, deseable en situaciones en las que se necesita incrementar la relación señal-ruido en las bandas de frecuencia correspondientes.^[23]

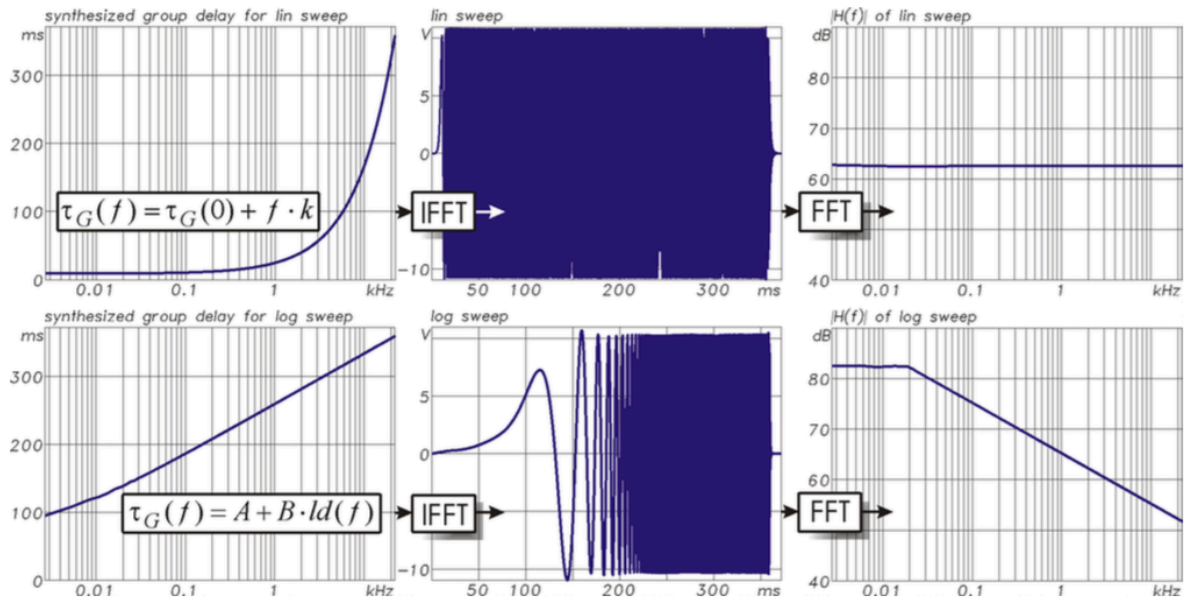


Fig. 4.5: Barrido sinusoidal lineal (superior) y logarítmico (inferior), creados en el dominio de la frecuencia.^[28]

El barrido lineal con amplitud constante resulta en un espectro correspondiente al del ruido blanco. El barrido exponencial, a su vez, corresponde en frecuencia al ruido rosa.

La principal ventaja de la medición con barrido sinusoidal frente al MLS reside en el hecho de que los componentes de la distorsión armónica pueden ser completamente eliminados de la respuesta al impulso obtenida. Estos componentes aparecen en los tiempos negativos, donde se pueden filtrar. De esta manera, la respuesta al impulso queda libre de energía procedente de la distorsión armónica. La Fig. 4.6 resume el procesado a partir de una excitación de barrido sinusoidal, que permite aplicar una ventana en la RIR obtenida, y eliminar las distorsiones armónicas de la medición. Las mediciones que utilizan el ruido pseudoaleatorio MLS como excitación tendrán inevitablemente una distribución de la distorsión producida sobre todo el periodo, que no se podrá eliminar en el procesado de la RIR.^[28] Cuando es necesario alcanzar una

relación señal-ruido elevada en ambientes con alto nivel de ruido de fondo, no es factible medir con MLS dada su limitación al incrementar la potencia del altavoz sin generar distorsión; sin embargo, estos niveles se pueden alcanzar fácilmente con los barridos, debido a la posibilidad de remover completamente la distorsión armónica en el procesado de la señal de respuesta.^[28,30]

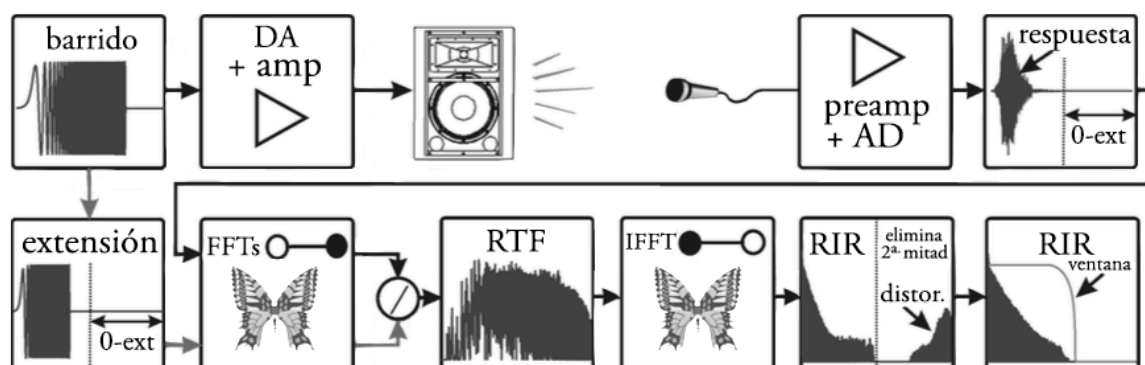


Fig. 4.6: Deconvolución lineal para obtención de la RIR. El procesado pone los productos de la distorsión armónica en los tiempos negativos, donde se pueden eliminar con un enventanado.^[28]

Los requisitos para el método de medición de la respuesta impulsiva con el barrido sinusoidal se resumen en^[21]:

- La excitación debe estar seguida de un periodo de silencio para permitir un registro correcto de la respuesta al barrido.
- El barrido debe empezar desde una frecuencia baja hasta una frecuencia más alta, tal y como se describe en el anexo B de la ISO 18233.
- No se permite el movimiento de la fuente o de los micrófonos durante la medición, ya que atentaría al requisito de invariabilidad temporal.
- Se debe evitar, en la medida de lo posible, la variación abrupta de las condiciones ambientales. Cambios significativos en la velocidad del aire, la temperatura o la humedad, pueden generar variaciones en la velocidad del sonido.
- Se debe calcular la respuesta al impulso de un recinto (RIR) suponiendo que se trata de un sistema LTI ideal.
- Los componentes de la distorsión armónica, que aparecen en los tiempos negativos de la respuesta al barrido, deben ser completamente eliminados de la respuesta al impulso obtenida a partir de la deconvolución lineal entre la respuesta y la señal de excitación.

A partir de un estudio comparativo entre diferentes métodos de medición de la respuesta impulsiva, con MLS y barrido sinusoidal, Guy-Bart at al.^[31] concluyen que:

- El método que emplea la señal MLS puede ser adecuado para mediciones realizadas en exteriores, dada su relativa inmunidad a todo tipo de ruido de fondo. Su mayor desventaja es la calibración del nivel de potencia de fuente, para obtener resultados sin la interferencia de las distorsiones no lineales intrínsecas al sistema de medida.
- Los barridos sinusoidales previenen el apareamiento de distorsiones armónicas, y posibilitan obtener una excelente relación señal-ruido. Pero la medición con esta técnica

es más sensible a ruidos residuales, especialmente aquellos con componentes tonales e impulsivos. Se recomienda la técnica que emplea el barrido sinusoidal en recintos vacíos o controlados, libres de una interferencia significativa del ruido de fondo.

Por lo tanto, aunque los barridos sinusoidales como fuente de excitación en el método de la función de transferencia presenten una mayor sensibilidad al ruido de fondo con componentes tonales y/o impulsivos, que influyen en el cálculo de la deconvolución de la respuesta al impulso, son aún los más apropiados para la aplicación en mediciones de acústica arquitectónica.^[32]

4.5 Criterios de la ISO 18233 para la Determinación del Nivel de Aislamiento Entre Recintos

4.5.1 Instrumentación

Dado que la metodología establecida en la ISO 18233 requiere un procesamiento matemático relativamente complejo para la obtención de la respuesta impulsiva, se necesita una plataforma computacional o electrónica que permita efectuar las operaciones correspondientes. Junto con un *software* que genere la señal de excitación determinística, se puede realizar el procesamiento de la señal de entrada según la ISO 18233, para determinar la respuesta al impulso de un recinto en función del tiempo y frecuencia.

Con respecto a la cadena de medida, es importante utilizar interfaces de audio con un alto rango dinámico, de manera que no limiten las capacidades de la medida. Un alto rango dinámico evita saturaciones en los canales de entrada, y permite diferenciar la señal de interés del ruido de fondo con mayor precisión.^[2]

4.5.2 Verificación de la relación señal-ruido efectiva

Cuando la relación señal-ruido es baja, el método clásico adopta un procedimiento de corrección de los niveles medidos en el recinto receptor de acuerdo con el nivel de ruido de fondo. Ya el método de la función de transferencia normalizado por la ISO 18233 no permite tales correcciones por banda de frecuencia, pues el procedimiento de determinación del aislamiento acústico se basa en la medición de la respuesta al impulso. En este caso, la relación señal-ruido efectiva sustituye a la relación señal-ruido del método clásico. Según la norma, si se cumple una relación señal-ruido efectiva de al menos 30 dB, se garantiza que la influencia del ruido de fondo será despreciable.^[21]

La relación señal-ruido efectiva viene dada por la Ec. 4.8:

$$\text{Rel. señal ruido efectiva} = 10 \log \left(\frac{10^{L_p/10}}{10^{L_{rf}/10}} \right)^2 \text{ dB} \quad \text{Ec. 4.8}$$

Donde L_p es el nivel de presión sonora medido de la señal de excitación en el recinto, y L_{rf} es el

nivel de ruido de fondo.

El requisito de la relación señal-ruido efectiva se aplica a todo tipo de medición de la respuesta impulsiva. En mediciones de aislamiento acústico entre recintos, su verificación es más crítica en el recinto receptor. Por lo tanto, antes de empezar a medir con este método, es necesario realizar una medición de tanteo de la respuesta al impulso y compararla, en bandas de frecuencia, con el nivel de ruido de fondo. Se debe asegurar la obtención de un nivel suficiente en la sala receptora sin que se saturen las mediciones a realizar en la sala emisora, de acuerdo con la sensibilidad de la entrada de audio utilizada.^[25]

4.5.3 Periodo de la señal de excitación

El periodo de adquisición de datos en mediciones con señales de excitación deterministas debe ser suficientemente largo como para capturar todos los componentes retardados, es decir, el decaimiento del sonido a cada frecuencia que se mida, según se ejemplifica en el diagrama de la Fig. 4.7. Esto significa que el barrido siempre debe ser más corto que el periodo de captura. En mediciones de acústica de salas, resulta beneficioso que el tiempo de reverberación para altas frecuencias sea usualmente más corto que a bajas frecuencias. Así, el tiempo de medición de la excitación en la sala será aproximadamente la suma del tiempo de barrido y el tiempo de reverberación a altas frecuencias, permitiendo que el periodo del barrido sea suficiente para que la reverberación de bajas frecuencias quede por detrás de las componentes de alta frecuencia en función del tiempo.^[28]

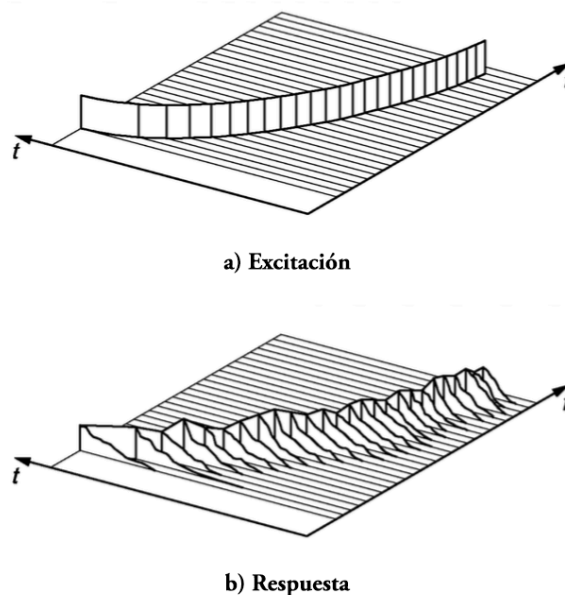


Fig. 4.7: (a) *Excitación* y (b) *decaimiento de la respuesta en función de la frecuencia (waterfall)*.^[4]

Cuando se trata de medir las respuestas impulsivas del recinto, conviene que la señal de excitación se acentúe hacia las frecuencias inferiores, por la influencia del ruido de fondo que generalmente es más significativo a bajas frecuencias. En este sentido, es preferible utilizar un barrido con un aumento exponencial de la frecuencia en función del tiempo, que simula en frecuencia el espectro del ruido rosa.^[28]

Con esta técnica de medida se puede usar desde barridos cortos hasta barridos muchas veces más largos que el tiempo de reverberación en cada banda. Sin embargo, el tiempo de adquisición para el registro de la respuesta al barrido debe ser más largo que el periodo del barrido, a fin de recuperar los niveles de presión sonora correspondientes a la reverberación de las últimas frecuencias (componentes retardados), hasta que se igualen al nivel de ruido de fondo. Consecuentemente, el requisito que existe para mediciones con MLS, que relaciona t_1 con el TR por banda de frecuencia (Ec. 4.2) no es importante en mediciones con barrido sinusoidal.^[4]

4.5.4 Cálculo de la diferencia de niveles D

De acuerdo con la norma ISO 18233^[4], la diferencia de niveles de presión sonora D , que determina el aislamiento acústico, se puede calcular según la Ec. 4.9, a partir de las respuestas impulsivas h_1 y h_2 , del recinto emisor y receptor respectivamente, medidas en una banda de frecuencia:

$$D = 10 \log \left[\frac{\int_0^\infty h_1^2(t) dt}{\int_0^\infty h_2^2(t) dt} \right] \text{ dB} \quad \text{Ec. 4.9}$$

Análogamente, puesto que $H(\omega)$ es la respuesta impulsiva en función de la frecuencia, obtenida por la transformada de Fourier de $h(t)$, se puede calcular la diferencia de niveles de presión sonora D a partir de $H_1(\omega)$ y $H_2(\omega)$, que son respectivamente la respuesta impulsiva en función de la frecuencia del recinto emisor y receptor, medidas en una banda de frecuencia, según la Ec. 4.10:

$$D = 10 \log \left[\frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |H_1(\omega)|^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |H_2(\omega)|^2 d\omega} \right] \text{ dB} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Una manera alternativa de calcular la diferencia de niveles D , para cada posición de fuente, es determinar los niveles de presión sonora promedios en los recintos emisor (\overline{L}_1) y receptor (\overline{L}_2), de acuerdo con las ecuaciones 4.11 y 4.12, respectivamente^[25]:

$$\overline{L}_1(f) = 10 \log(|\overline{H}_1(f)|^2) + 10 \log\left(\frac{|X(f)|^2}{p_0^2}\right) \quad \text{Ec. 4.11}$$

$$\overline{L}_2(f) = 10 \log(|\overline{H}_2(f)|^2) + 10 \log\left(\frac{|X(f)|^2}{p_0^2}\right) \quad \text{Ec. 4.12}$$

Donde $\overline{H}_1(f)$ y $\overline{H}_2(f)$ son las funciones de transferencia promedio medidas en el recinto emisor y receptor, respectivamente; $X(f)$ es la señal de excitación del recinto emisor, p_0 es la presión sonora de referencia, y f es la frecuencia central de la banda.

Al restar los niveles promedios \overline{L}_1 y \overline{L}_2 , calculados para la j -ésima posición de fuente, se determina la diferencia de niveles $D_j(f)$, a través de la ecuación alternativa:

$$D_j(f) = \overline{L}_{1j}(f) - \overline{L}_{2j}(f) = 10 \log(|\overline{H}_{1j}(f)|^2) - 10 \log(|\overline{H}_{2j}(f)|^2) \text{ dB} \quad \text{Ec. 4.13}$$

El cálculo de la diferencia de niveles D del cerramiento, para la banda de frecuencia f , es el promedio energético de los niveles $D_j(f)$.

5. MÉTODO DE LA SEÑAL IMPULSIVA

Además de las mediciones de acústica por el método de la función de transferencia, las señales impulsivas pueden ser eficaces en la definición de la diferencia de niveles entre recintos, de acuerdo con la metodología presentada por Deželak et al.^[3]. El método de la señal impulsiva para mediciones del aislamiento acústico se basa en los procedimientos del método clásico, con la diferencia de que la señal de excitación es un impulso, y que el parámetro de medida para caracterizar su nivel acústico es el nivel de exposición sonora (SEL), con lo que se determina la diferencia de niveles entre recintos receptor y emisor.

Este capítulo se centra en las características de las fuentes de ruido impulsivo que se emplean en mediciones de acústica, el análisis de las ventajas de este método en relación a los dos métodos vistos en los capítulos 3 y 4, y en la medición y cálculo de la diferencia de niveles de exposición sonora.

5.1 Características de las Fuentes de Ruido Impulsivo

Como criterio de evaluación objetiva y subjetiva de la adecuación de diferentes fuentes de excitación en ensayos acústicos, se pueden establecer requisitos de una fuente de excitación ideal para su utilización en mediciones *in situ*^[33]:

- Ser suficientemente pequeña y ligera, para facilitar el transporte;
- Poseer un ajuste de nivel de potencia, que permita adecuar la excitación a la circunstancia de ensayo;
- Tener un grado de repetibilidad que posibilite un promedio coherente de las mediciones;
- Ser omnidireccional;
- Ser autosuficiente;
- Tener bajo coste de producción y operación;
- Que no presente peligro al operador al manipularla, transportarla y utilizarla en las mediciones.

De las fuentes de ruido impulsivo que se presentan a continuación, en el estudio experimental se ha trabajado fundamentalmente con la pistola de fogeo, aunque también se han empleado globos de látex en algunos de los ensayos, como se verá más adelante.

5.1.1 Pistolas de fogeo

En un estudio comparativo sobre la emisión sonora de diferentes calibres de pistola de fogeo, Lamothe y Bradley^[34] concluyen que una pistola de calibre 9 mm presenta excelentes

resultados como fuente de ruido impulsivo en ensayos de acústica arquitectónica, en especial a bajas frecuencias, y una variación de la directividad inferior o igual a $\pm 2,5$ dB, incluso a altas frecuencias, en las que las fuentes en general presentan un factor de directividad de emisión más elevado. Es importante que la señal de excitación sea de gran calidad para asegurar un bajo error asociado a la medición de las respuestas al impulso.^[35] La Fig. 5.1 muestra el nivel de presión acústica medido a la misma distancia, producido por diferentes calibres de pistola de fuego.

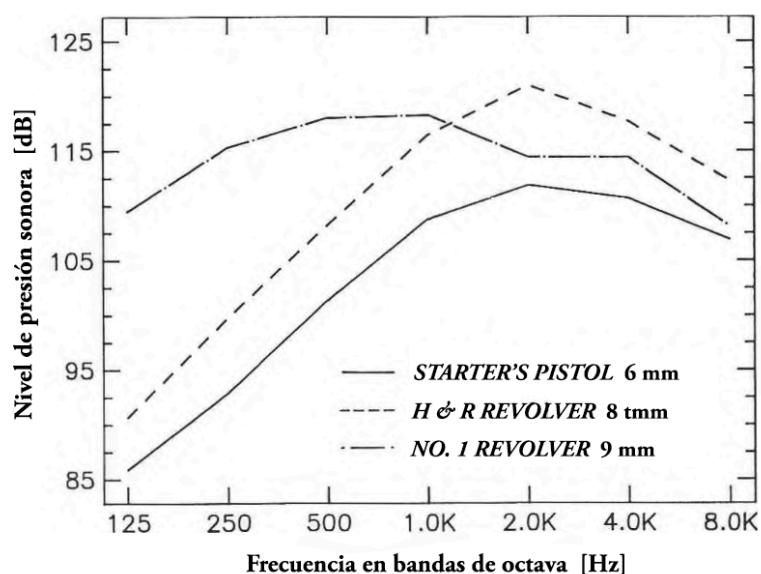


Fig. 5.1: Comparativo de diferentes calibres de pistola, en bandas de octava e incidencia a 0° ^[34]

Según un estudio reciente presentado por Deželak et al.^[3], la explosión en el cañón de la pistola es la principal fuente de ruido, y se puede considerar como una fuente tubular que, en la escala de un recinto, es similar a un monopolo de radiación sonora. Observan, asimismo, que la repetibilidad de los disparos es alta para cartuchos utilizados en una misma pistola de 9 mm, y que se puede considerar despreciable la diferencia de nivel de potencia en razón de las pequeñas diferencias en la cantidad de pólvora de cada una de las balas. Si se compara con la repetibilidad de los altavoces normalizados, los autores argumentan que el uso de una pistola de fuego es aceptable, pues tampoco los altavoces poseen una perfecta repetibilidad, debido a que la potencia puede variar en función del aumento de la temperatura en la bobina y en el imán del transductor.

En relación a las fuentes de sonido estacionario, el nivel de potencia sonora que emiten se puede estimar a través de la aplicación de la serie ISO 3740, que define criterios para ensayos en diferentes campos acústicos y grados de precisión de los resultados. Para una fuente que emite ruido estacionario, también se puede utilizar la técnica normalizada de intensimetría^[36]. Sin embargo, para estimar el nivel de potencia de una fuente impulsiva, el Anexo C de la ISO 3740 ^[37] establece que el método de estimación por presión es el único que se aplica a fuentes que emiten ruido transitorio, en uno de los tres grados de precisión de la medición que dispone esta serie: precisión (1), ingeniería (2) y control (3), de acuerdo con las normas ISO 3745, ISO 3744 e ISO 3746, respectivamente.

Al medir el nivel de presión acústica de ruido estable en el tiempo, se puede determinar un promedio temporal midiendo el nivel de presión sonora equivalente en un periodo T ($L_{eq,T}$).

Cuando se busca medir un suceso sonoro impulsivo, interesa conocer la cantidad de energía sonora que se recibe, normalizada en un tiempo de referencia acotado. Para ello, se utiliza como parámetro de medida el nivel de exposición sonora (SEL, L_E) que es el nivel sonoro que, mantenido constante durante 1 segundo, tiene la energía sonora equivalente a la acumulada en una medición de duración T . Se puede determinar el SEL de un suceso sonoro impulsivo midiendo el nivel de presión sonora equivalente $L_{eq,T}$ en un periodo suficientemente largo para captar el impulso y el decaimiento del sonido, y luego aplicar la Ec. 5.1 de conversión a SEL:

$$SEL = L_{eq} + 10 \log \left(\frac{T}{1s} \right) \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde L_{eq} es el nivel de presión equivalente del suceso impulsivo medido en un tiempo T [s]

Mediciones realizadas por Hak et al.^[20] de la emisión sonora de un disparo de pistola en campo libre sobre una superficie reflectante muestran un comportamiento omnidireccional de la señal impulsiva, si se apunta el cañón del arma hacia arriba, por encima de la cabeza del operador. Deželak et al.^[3] a su vez realizan una estimación del nivel de potencia sonora de una pistola de fogeo de 9 mm, de acuerdo con la norma ISO 3744 para ensayos en campo libre sobre un plano reflectante. En este ensayo, la pistola se dispara a una distancia de 10 cm por encima del suelo, y los 10 puntos de medición se toman sobre una superficie de medición semiesférica de 1 m de radio y 6,28 m² de área equivalente. Las mediciones del nivel de presión sonora se realizan en bandas de tercio de octava, desde 50 Hz a 5 kHz, y los resultados en cada punto de medición y del promedio energético se presentan en el gráfico de la Fig. 5.2:

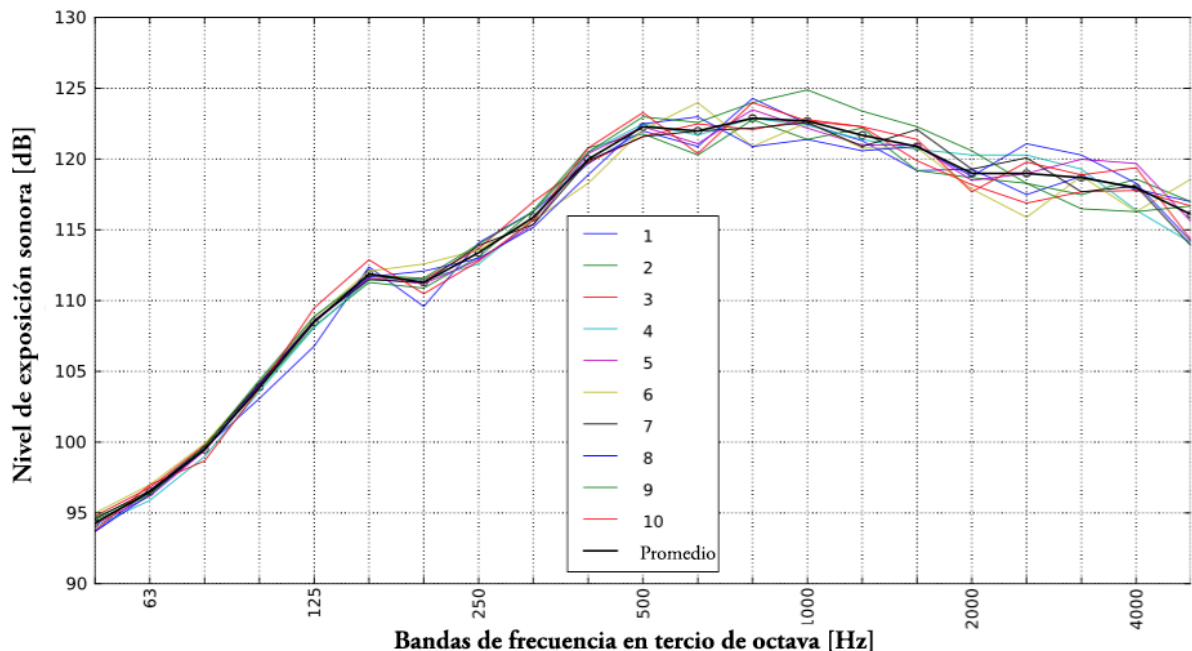


Fig. 5.2: Espectro de nivel de exposición sonora SEL en bandas de tercio de octava, de una pistola Ekol special 99, de calibre 9 mm.^[3]

El nivel de potencia sonora global estimado para la pistola en este ensayo es:

$$L_W = 10 \log \sum_{f=50 \text{ Hz}}^{5000 \text{ Hz}} 10^{0,1 L_{wf}} = 131,8 \text{ dB}$$

5.1.2 Chispas de energía eléctrica

En un estudio comparativo entre tipos de fuente impulsiva, Lamothe y Bradley^[34] concluyen que las chispas de energía eléctrica son menos satisfactorias para mediciones de acústica de salas pues no generan altos niveles de energía sonora a bajas frecuencias; además, no se trata de una fuente de ruido portátil y requiere una alimentación de alta tensión, peligrosa e inconveniente. Sin embargo, la directividad de emisión y la repetibilidad de las chispas de energía son similares a las de una pistola de 9 mm, y pueden ser útiles en mediciones en las que se requieren altos niveles de excitación a altas frecuencias. En el mismo estudio, los autores observaron que las señales emitidas por chispas eléctricas pueden ser satisfactorias en algunos ensayos, dado que poseen un espectro de emisión de banda ancha suave, sin componentes tonales.

5.1.3 Globos de látex

Un estudio empírico realizado por Pätynen et al.^[38] sobre el espectro de frecuencias y directividad de emisión de impulsos generados por explosiones de 160 globos de diámetro máximo igual a 40 cm – inflados con un volumen controlado y medidos en una cámara anecoica utilizando un *array* esférico de micrófonos – concluye que la directividad a bajas frecuencias de explosiones de globos de látex no está de acuerdo con los requisitos de la normativa internacional para fuentes destinadas a mediciones en acústica de salas. Sin embargo, cuanto más grande es el diámetro del globo, mejor son sus prestaciones a bajas frecuencias. El espectro y el nivel de potencia sonora de la explosión de los globos permanecieron constantes en aquellos inflados con un mismo volumen de aire.

5.1.4 Señales impulsivas digitales

Aoshima^[39] discute los métodos de generación digital y aplicación de señales impulsivas para mediciones de acústica, modeladas con espectro de potencia plano a través de la transformada inversa de Fourier. El autor argumenta que la generación de señales impulsivas con fuentes como pistolas, chispas de energía eléctrica o globos, no conforman en la práctica un espectro de potencia plano, incluso si se analiza un estrecho rango de frecuencias. No obstante, estos tipos de señal de excitación se utilizan en diferentes aplicaciones y poseen ventajas, como la posibilidad de análisis temporal de la respuesta y un rápido procesamiento computacional, dada la corta duración del suceso sonoro.

Al emplear impulsos modelados digitalmente según el método presentado por el autor, se puede tanto obtener un espectro idealmente plano como garantizar una alta reproducibilidad. El problema de este tipo de señal de excitación es que no se elimina la necesidad de utilizar un altavoz omnidireccional, y la directividad de la señal acústica depende, en este caso, de las características del altavoz.

5.2 Ventajas del Disparo de una Pistola de Fogueo como Señal de Excitación

En mediciones de aislamiento a ruido aéreo *in situ* de cerramientos con alto nivel de aislamiento o en ambientes con un nivel de ruido de fondo muy elevado, pueden aparecer problemas relacionados con la excitación del recinto emisor. En estas situaciones, es difícil obtener una adecuada relación señal-ruido y cumplir los requisitos de la norma ISO 16283-1. Otra dificultad surge a la hora de excitar todos los modos propios de la sala emisora, en especial a bajas frecuencias y en grandes recintos, utilizando una fuente dodecaédrica convencional.^[3]

El método clásico de medición del aislamiento a ruido aéreo *in situ* tiene limitaciones de orden técnico y práctico: el volumen y el peso del equipamiento de medición que se debe transportar, fuera de que no siempre se dispone de energía eléctrica para alimentar la fuente. Por otra parte, dependiendo del nivel de ruido de fondo, la fuente dodecaédrica convencional puede no tener potencia suficiente para emitir la energía sonora necesaria a bajas frecuencias, y cumplir así con los requisitos mínimos de la relación señal-ruido en el recinto receptor^[33]. Frente a estos inconvenientes, las ventajas de emplear fuentes de ruido impulsivo como señal de excitación en ensayos de aislamiento acústico, son^[3]:

- En razón de sus dimensiones reducidas, la pistola de fogueo se aproxima más a una fuente puntual si se compara con el tamaño de una fuente dodecaédrica, especialmente al tener en cuenta el factor de escala de un recinto pequeño. Esto hace que, en estas circunstancias, se disminuya la directividad de emisión de energía sonora, principalmente a bajas frecuencias;
- La pistola es capaz de emitir un nivel de potencia significativamente mayor a bajas frecuencias, principalmente en las bandas de 50, 63 y 80 Hz;
- Se trata de una fuente de ruido de pequeñas dimensiones, ligera, fácil de transportar y utilizar;
- Es una fuente autosuficiente, que no necesita una conexión con la red eléctrica, ni baterías para su funcionamiento;
- Es una fuente relativamente barata;
- La señal impulsiva de pistolas de fogueo ya se utiliza en mediciones de parámetros de acústica de salas, de acuerdo con la serie ISO 3382;
- El empleo del disparo de una pistola como señal de excitación impulsiva posibilita estimar el aislamiento acústico sin las contribuciones de la transmisión lateral (transmisión por flancos), de acuerdo con el método descrito por Raes.^[40]

5.3 Medición y Cálculo del Aislamiento a Ruido Aéreo con una Señal Impulsiva

Un método de medición del aislamiento a ruido aéreo entre recintos con señal impulsiva se detalla en Deželak et al.^[3] y se basa en la medición de la diferencia de nivel de exposición sonora SEL de una secuencia de disparos. El método sigue los criterios de muestreo espacial del método clásico descrito en la ISO 16283-1, pero aplica el teorema de reciprocidad de Green para invertir los puntos de excitación y medición, lo que resulta en un número mínimo de cinco puntos de disparo en el recinto emisor para cada posición de micrófono, siendo dos posiciones de medición en el recinto emisor y otras dos en el receptor. Según este método, los disparos se realizan en secuencia, y se mide el SEL para cada posición de micrófono, disminuyendo significativamente el tiempo requerido para un ensayo completo de aislamiento entre recintos.

Al medir el nivel de exposición de una secuencia de disparos en el recinto emisor y receptor, la diferencia de niveles para cada posición de micrófono se determina a través de la Ec. 5.2:

$$D_j = SEL_{1j} - SEL_{2j} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Donde SEL_{1j} es el nivel de exposición sonora medido en la j -ésima posición de micrófono, y SEL_{2j} es el nivel correspondiente en el recinto receptor. La diferencia de niveles D del cerramiento es el promedio energético de los niveles D_j .

Sin embargo, si se opta medir cada disparo por separado, se debe realizar un cálculo del promedio energético de los niveles de exposición en el recinto emisor para la j -ésima posición de micrófono de los n puntos de excitación:

$$\overline{SEL}_{1j} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 SEL_{1ij}} \quad \text{Ec. 5.3}$$

De manera similar, se calcula el nivel promedio en el recinto receptor:

$$\overline{SEL}_{2j} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 SEL_{2ij}} \quad \text{Ec. 5.4}$$

La diferencia de niveles para cada posición de micrófono se determina a través de la Ec. 5.5:

$$D_j = \overline{SEL}_{1j} - \overline{SEL}_{2j} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Donde \overline{SEL}_{1j} es el promedio de niveles de exposición sonora de un total de n puntos de excitación del recinto emisor tomados en la j -ésima posición de micrófono, y \overline{SEL}_{2j} es el promedio correspondiente en el recinto receptor. La diferencia de niveles D del cerramiento es el promedio energético de los niveles D_j .

La comparación de los resultados obtenidos a partir del ensayo clásico de la ISO 16283-1 y el método propuesto con la señal impulsiva demuestra una diferencia máxima de ± 1 dB por encima de la banda de 63 Hz, una diferencia de ± 4 dB en la banda de 63 Hz y de ± 7 dB en la de 50 Hz para el método con ruido impulsivo. La diferencia que se observa en las bajas frecuencias se debe, según los autores, a que la fuente utilizada en el ensayo clásico no cumple los requisitos de relación señal-ruido establecidos por la ISO 16283-1 mientras que la señal impulsiva de la pistola satisface en 25 dB, como mínimo, la diferencia en relación al ruido de fondo en el recinto receptor, en las medias-altas frecuencias, y 13 dB por encima del ruido de fondo en las bajas frecuencias, resultando en una excelente relación señal-ruido que reduce significativamente el error asociado a la medición en las bandas de 50, 63 e 80 Hz.^[3]

Según Deželak et al.^[3], las ventajas encontradas a partir de la comparación entre los resultados de la técnica de medición con señal impulsiva en relación del método clásico son:

- Capacidad de mejora de la relación señal-ruido en el recinto receptor, principalmente a bajas frecuencias, si se compara con las prestaciones de una fuente de ruido aleatorio convencional;
- El método con señal de excitación impulsiva de una pistola de 9 mm presenta resultados más fiables a las bajas frecuencias;
- Es un método rápido de implementar, puesto que se toman los muestreos de disparo en una misma medida de SEL, para cada posición de micrófono;
- Es una fuente de ruido fácil de transportar, instalar, mantener y operar.

PARTE II : APLICACIÓN DE LOS NUEVOS MÉTODOS

Comparación entre métodos de medición del aislamiento a ruido aéreo *in situ*

6. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

Se ha realizado un estudio experimental que se centra en la aplicación de los procedimientos de medida analizados en la Parte I de este trabajo, para calcular la diferencia de niveles de presión acústica (D) entre recintos, que es el parámetro base del aislamiento a ruido aéreo. Por lo tanto, se realizan mediciones del aislamiento acústico mediante los métodos clásico, de la función de transferencia y de la señal impulsiva, con el fin de comparar estos tres procedimientos de medición y sus resultados mediante tres casos de estudio distintos, llevados a cabo en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Valladolid (ETSA-UVa). El objetivo principal es describir y analizar críticamente la implementación de los métodos, el procesamiento de datos y la coherencia de los resultados obtenidos.

En el presente capítulo se describen los tres casos de estudio, la cadena de medida en cada uno de los tres métodos utilizados, y la metodología de obtención de los resultados numéricos.

Antes de la realización de los ensayos fue necesario un periodo de pruebas de las técnicas de medición en el Departamento de Física Aplicada. Se dedicó más tiempo a la consecución y al correcto procesamiento de los datos obtenidos con el método de la función de transferencia, que exige el uso de un *software* dedicado a medir la respuesta impulsiva de los recintos. Se trata de un método sensible a las variaciones ambientales y más susceptible a errores en la toma de la respuesta a la excitación de la sala. El procesamiento de los datos numéricos obtenidos según cada método de medición, y expresados siempre en bandas de frecuencia de tercios de octava, se ha detallado en los apartados 3.1.8, 4.5.4 y 5.3 dedicados al cálculo de la diferencia de niveles (D).

Las pruebas anteriores a los ensayos se realizaron en el Departamento de Física Aplicada de la ETSA-UVa debido a que ya se conocía el aislamiento a ruido aéreo entre la zona común y la biblioteca de la unidad, gracias a ejercicios prácticos de medición según el método clásico, realizados en la asignatura de Aislamiento Acústico del Máster. Teniendo como referencia estos niveles de aislamiento, se trató de implementar los nuevos métodos de medición y definir los parámetros de la señal de excitación del método de la función de transferencia, a fin de evaluar la coherencia de los resultados obtenidos.

6.1 Casos de Estudio

Se escogieron tres pares de recintos para estimar la diferencia de niveles, aplicando cada uno de los métodos de medida: entre salas de juntas (Fig. 6.1), entre aulas (Fig. 6.2), y entre la zona común y la biblioteca del departamento de Física Aplicada (Fig. 6.3) de la ETSA-UVa. La selección de recintos estaba limitada por una parte por la accesibilidad a los mismos fuera del horario de apertura del centro y por otra a la propia disposición geométrica de los recintos, pues al trabajar con métodos de ensayo novedosos, se prefería contar con disposiciones geométricas sencillas.

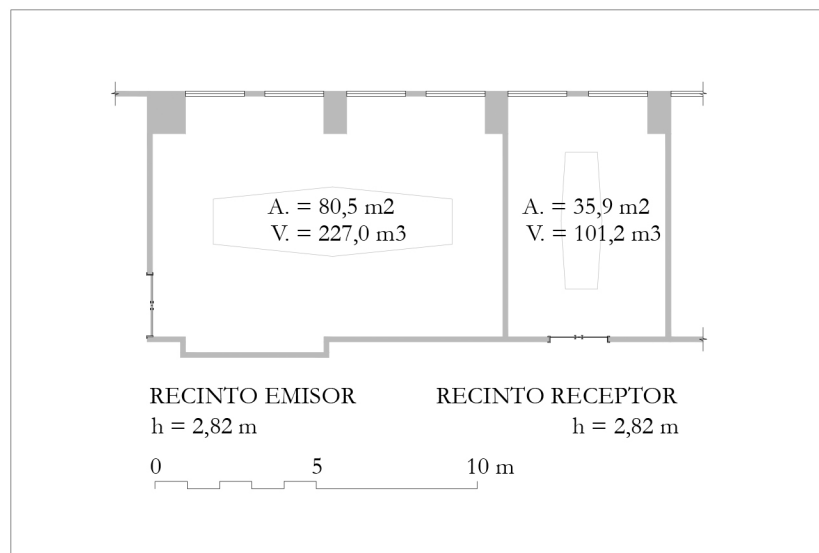


Fig. 6.1: Caso de estudio 1 - Salas de juntas, ETSA-UVa.

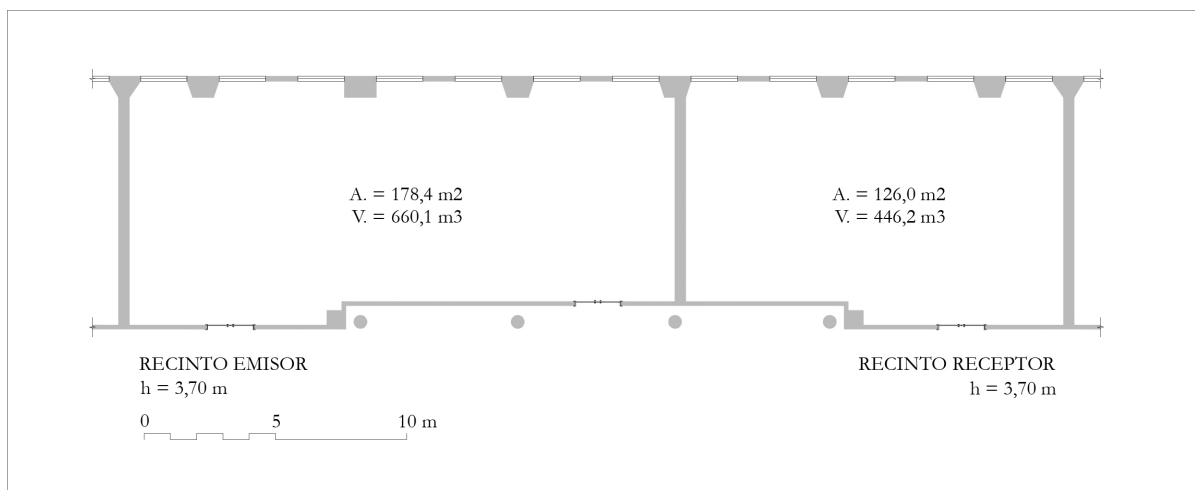


Fig. 6.2: Caso de estudio 2 - Aulas, ETSA-UVa.

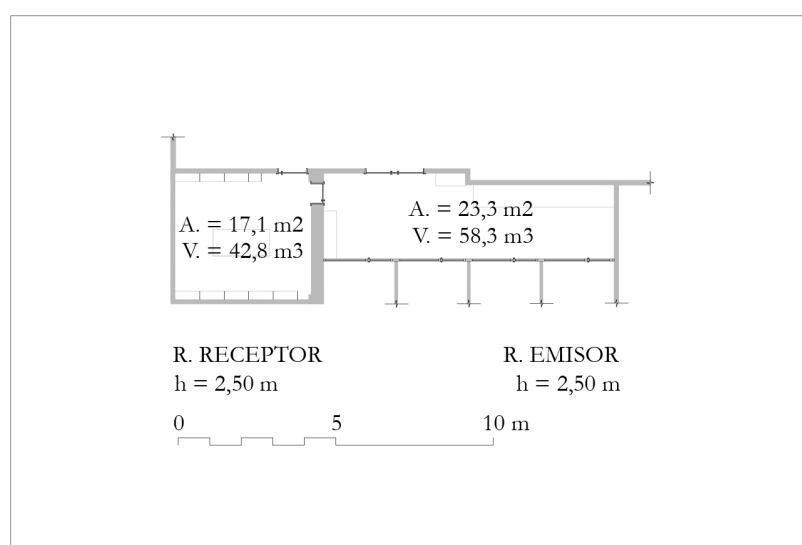


Fig. 6.3: Caso de estudio 3 - Departamento de Física Aplicada, ETSA-UVa.
Se toma la zona común como recinto emisor y la biblioteca como recinto receptor.

Todos los recintos estaban amueblados y sin ocupación durante las mediciones, que se realizaron en horarios sin actividades en la Escuela de Arquitectura; es decir, durante los fines de semana y/o por las noches.

Los cerramientos entre las salas de juntas y entre las aulas tienen en uno de sus lados, como elemento de flanco, una fachada con acristalamiento. En ambos casos, no existe puerta o ventana que comunique los pares de recintos. Por otro lado, el cerramiento medido en el Departamento de Física Aplicada sí tiene una puerta que comunica la biblioteca con la zona común, por lo que se espera un nivel de aislamiento menor, comparado con los demás casos de estudio. Incluso cerrada, la puerta disminuye considerablemente la capacidad de protección al ruido aéreo del sistema recinto-pared-recinto.

No se ha podido conseguir la descripción exacta de los cerramientos que separan cada par de recintos, lo cual en todo caso no es necesario conocer para el estudio que se pretende llevar a cabo.

6.2 Instrumentación y Software de Procesado Utilizado

A continuación se enumeran los equipos utilizados en la realización de todos los ensayos:

- Sonómetro analizador SOLO *Black Edition* 01dB con micrófono de condensador prepolarizado omnidireccional MCE 212 de 13,2 mm ($\frac{1}{2}$ ") y clase 1 (IEC 61672-1);
- Calibrador de sonómetro Brüel & Kjær para autoverificación;
- Ordenador portátil Macbook Pro con procesador Intel Core 2 Duo a 2,66 GHz, y 6 GB de memoria RAM;
- Interfaz de audio TASCAM modelo US-366 USB 2.0 de dos canales, que permite usar la interfaz tanto para la salida de la señal de excitación como para la entrada de la señal recogida por el micrófono, según el método empleado;
- Micrófono de condensador prepolarizado omnidireccional NTI M2010 de 13,2 mm ($\frac{1}{2}$ ") y clase 1 (IEC 61672-1);
- Altavoz omnidireccional dodecaédrico y amplificador digital Look-Line DA 304 de nivel de potencia máximo de 122 dB.re 1 pW;
- AKG WMS 40 Pro mini (*instrumental set*) para transmisión inalámbrica UHF de la señal desde la interfaz de audio al amplificador del altavoz;
- Pistola semiautomática de 9 mm Ekol Sava EK26;
- Balas detonadoras P. A. Knall Nick de 9 mm;
- Globos de látex;
- Distanciómetro láser.

Para la obtención de los datos numéricos en las mediciones de la respuesta impulsiva del recinto (RIR) en los ensayos con el método de la función de transferencia se utilizó el programa REW en su versión 5.14 para el sistema operativo Mac. El REW (Room EQ Wizard)^[41], diseñado por John Mulcahy, es un *software* que facilita la determinación de la respuesta impulsiva de recintos y de altavoces a través de barridos sinusoidales. A partir de las respuestas al impulso tomadas, el programa permite realizar promedios de los resultados en función de la frecuencia, restar logarítmicamente resultados, suavizar los espectros en función de bandas de frecuencia y exportar los resultados a través de un archivo de texto. Aunque no se utiliza en este estudio experimental, el REW también calcula el tiempo de reverberación así como diferentes índices del ámbito de la acústica de salas.

Para procesar las mediciones realizadas con el sonómetro analizador, se utiliza el *software* dBbati. Todos los resultados numéricos de las mediciones con los tres métodos se exportan a través de un archivo de texto a una hoja de cálculo Excel, que se ha diseñado para el procesamiento de datos y preparación de las gráficas que se presentan este trabajo.

6.2.1 Cadena de medida del método clásico

En los ensayos realizados con el método clásico, se utiliza la cadena de medida ilustrada en la Fig. 6.4:

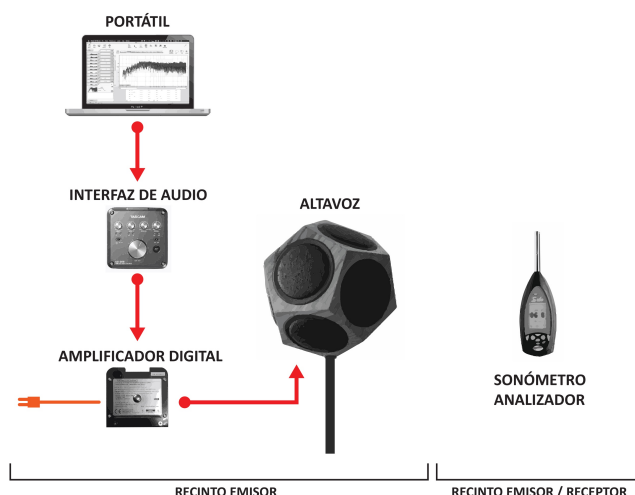


Fig. 6.4: Cadena de medida. Método clásico (ISO 16283-1).

En este método, el altavoz se enciende y se apaga con ayuda de un mando a distancia, lo que posibilita la realización de la medición por un solo operador.

Se utiliza el ordenador portátil para generar una señal de ruido aleatorio ecualizado según la respuesta en bandas de frecuencia del altavoz. Esta ecualización de la señal acústica se realiza a partir de los resultados del nivel de presión sonora instantáneo, obtenido con el sonómetro analizador a un metro de distancia de la fuente. Con ayuda del programa MyNoise^[42], se puede ecualizar en bandas de octava el contenido espectral de la señal generada, sin la necesidad de emplear un ecualizador gráfico en la cadena de medida. Este procedimiento exime del uso de un ruido aleatorio de contenido espectral predeterminado, pero requiere un trabajo de ecualización de la señal de excitación en la etapa de generación. Con ello se trata de compensar la no linealidad de la respuesta del altavoz y asegurar la obtención de un ruido con espectro semejante al del ruido

rosa, medido y calibrado *in situ*. En este trabajo, el producto de tal procedimiento se denomina *ruido rosa efectivo*.

6.2.2 Cadena de medida del método de la función de transferencia

En los ensayos realizados con el método de la función de transferencia, se utiliza la cadena de medida que se ilustra en la Fig. 6.5:

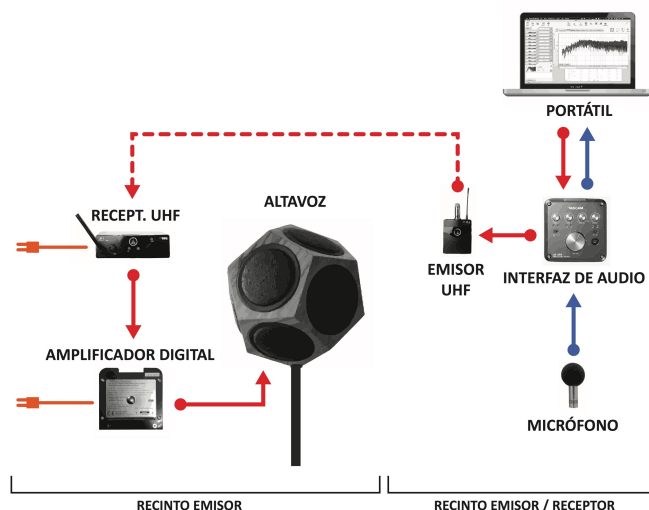


Fig. 6.5: Cadena de medida. Método de la función de transferencia con un canal de entrada (ISO 18233 e ISO 16283-1).

En este método, el altavoz se enciende y se apaga según el procedimiento de medición por defecto del *software* REW, en la obtención de la respuesta al impulso de un recinto (RIR).

El ordenador portátil y la interfaz de audio, a través del programa REW, posibilitan generar la señal de barrido sinusoidal, enviarla al amplificador del altavoz, recibir la señal de respuesta del micrófono y convertirla en señal digital. A partir de la excitación y respuesta obtenida, el programa calcula la respuesta al impulso del recinto a través de una deconvolución lineal de las dos señales, de acuerdo con el procedimiento que se presentó en la Fig. 4.6. Dado que al efectuar las medidas en el recinto receptor la interfaz de audio debe comunicarse simultáneamente con dispositivos situados en los recintos emisor y receptor, se opta por la utilización de una transmisión inalámbrica UHF desde la salida de la interfaz de audio al amplificador del altavoz en el recinto emisor, lo cual evita una extensión del cable TRS entre ambos dispositivos.

Los resultados numéricos de la RIR en función de la frecuencia, que se calculan con el programa REW, se exportan a un archivo de texto y luego a una hoja de cálculo Excel diseñada para el adecuado estudio de los datos.

6.2.3 Cadena de medida del método de la señal impulsiva

Para los ensayos realizados con el método de la señal impulsiva, la cadena de medida se reduce a una fuente de ruido autosuficiente (globo o pistola) y un sonómetro analizador, según la Fig. 6.6:

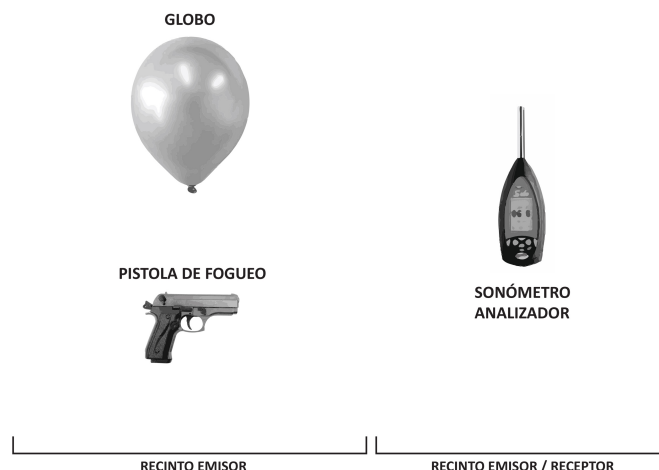


Fig. 6.6: Cadena de medida. Método de la señal impulsiva (Deželak et alii ^[3] e ISO 16283-1).

En este caso, ya que no se dispone de un sistema de accionamiento remoto de la fuente o del sonómetro analizador, se requiere el trabajo de dos operadores: el primero explota el globo o dispara la pistola de foguero con el cañón del arma apuntado hacia arriba a la altura que indica la norma ISO 16283-1 (1,20-1,50 m desde el suelo), y el segundo opera el sonómetro. Por lo tanto, esta solución requiere un sistema adicional de comunicación entre los operadores para sincronizar la emisión del impulso y la medición en el recinto receptor.

6.3 Metodología

En cada método de medición se observan los requisitos establecidos por las normas internacionales aplicables y las recomendaciones de los autores de la bibliografía, para obtener la diferencia de niveles entre recintos (D), según se presenta en los capítulos anteriores:

- Método Clásico: método según la norma ISO 16283-1, descrito en el capítulo 3;
- Método de la Función de Transferencia: método según el procedimiento de la norma ISO 16283-1, y los requisitos especificados en la norma ISO 18233. En este trabajo se elige medir utilizando barridos sinusoidales exponenciales (ISO 18233-BS, Anexo normativo A), dadas sus ventajas en mediciones de acústica arquitectónica^[31,32], como se ha comentado en el capítulo 4;
- Método de la Señal Impulsiva: método según el procedimiento presentado en el artículo de Deželak et al.^[3], basado en la norma ISO 16283-1 y descrito en el capítulo 5.

Todos los resultados numéricos de las mediciones, en función de la frecuencia, se convierten en archivos de texto y se exportan a hojas de Excel, previamente elaboradas y adaptadas a los procedimientos específicos de cada método para el cálculo de la diferencia de niveles D . Estos procedimientos han sido descritos en los apartados correspondientes, a saber:

- Método Clásico: apartado 3.1.8;
- Método de la Función de Transferencia: apartado 4.5.4;
- Método de la Señal Impulsiva: apartado 5.3.

Todos los ensayos realizados se ajustan a las siguientes condiciones:

- Altura de la fuente de excitación igual a 1,30 m desde el suelo;
- Altura del micrófono igual a 1,30 m;
- Si un punto de medición se ubica sobre una mesa, se resta la altura correspondiente para mantener una altura relativa al suelo de 1,30 m;
- Distancias entre fuentes y micrófonos, en relación a las paredes laterales y al cerramiento separador, de acuerdo con las distancias mínimas establecidas por la ISO 16283-1, que se detallan en el apartado 3.1.5 de este trabajo;
- Los puntos de excitación del recinto emisor se ubican considerando las dimensiones y proporciones de los recintos. En el caso de las aulas y del departamento, proporcionalmente más estrechas, las posiciones de fuente se han situado en la región entre la mitad y tres cuartos de la longitud de la sala, desde el cerramiento separador. Se busca, en la medida de lo posible, una distribución homogénea de los puntos de medición en el recinto emisor y receptor, teniendo en cuenta el amueblamiento de las salas.

Los puntos de medición y excitación, la cantidad exacta de posiciones, el parámetro que se mide, el tiempo de excitación y de medida, y la cantidad de promedios en cada uno de los ensayos se detallan en los siguientes apartados.

6.3.1 Método clásico

El procedimiento por defecto del denominado ensayo clásico de aislamiento a ruido aéreo *in situ*, normalizado por la ISO 16283-1, está detallado en el apartado 7 de esta norma internacional y es el método más conocido y utilizado por especialistas en acústica, comparado con las técnicas alternativas menos conocidas descritas en la norma ISO 18233, sobre la aplicación de nuevos métodos de medición en la acústica de los edificios.

El método clásico empleado en el presente trabajo utiliza un solo altavoz en más de una posición, que emite un ruido aleatorio entre 50 Hz y 5 kHz y que se genera y se ecualiza a través del programa MyNoise^[42]. Para ello se mide el nivel de presión sonora a 1 m de la fuente dodecaédrica, buscando compensar la no linealidad de la fuente y obtener una señal de ruido rosa efectivo tal y como se ha mencionado en el apartado 6.2.1.

En los puntos de medida, se mide el nivel de presión acústica equivalente a un periodo de 15 s (Leq,15s) tanto en el recinto emisor como en el receptor, para cada posición de fuente. Antes

de la medición en cada uno de los puntos del recinto receptor, se mide así mismo el $Leq,15s$ del ruido de fondo. Se calculan los niveles de presión promediados en cada uno de los recintos – en cinco posiciones de micrófono como mínimo – y se corrigen los niveles obtenidos en el recinto receptor en función del ruido de fondo medido de acuerdo con el apartado 9.2 de la norma ISO 16283-1^[18]. Los puntos de excitación y medición en cada caso de estudio se distribuyen según las figuras 6.7 a 6.9:

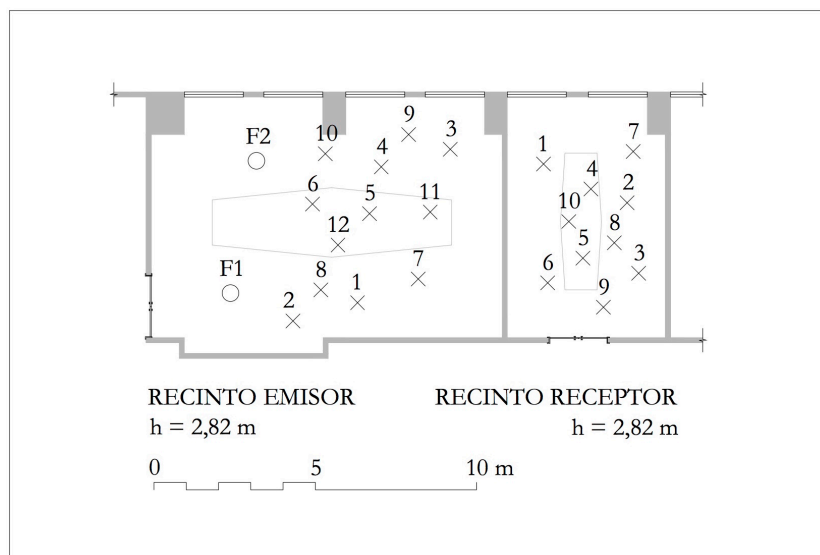


Fig. 6.7: Salas de juntas. Puntos de excitación (F1 y F2) y puntos de muestreo espacial de la medición en el recinto emisor (1-12) y recinto receptor (1-10).

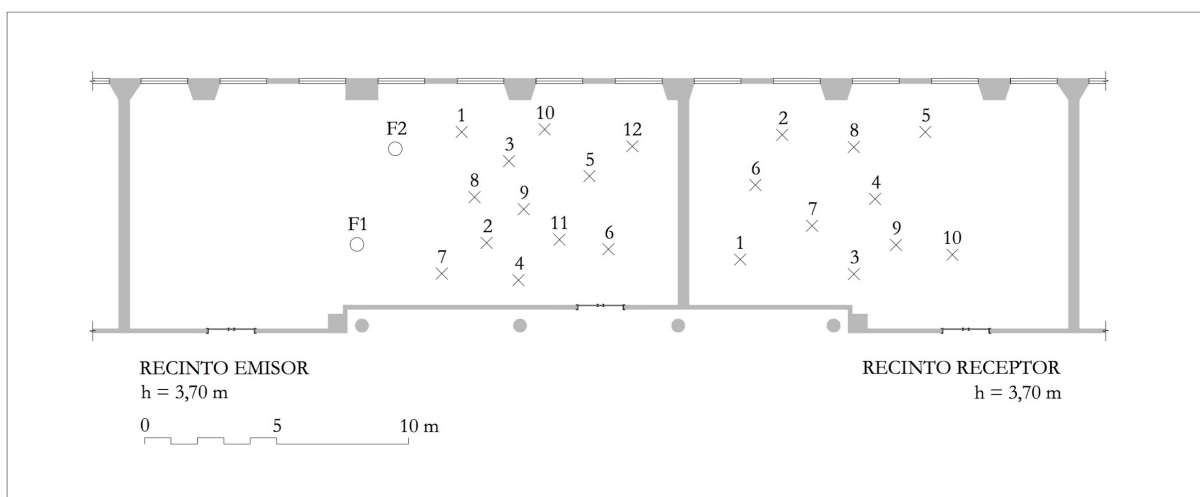


Fig. 6.8: Aulas. Puntos de excitación (F1 y F2) y puntos de muestreo espacial de la medición en el recinto emisor (1-12) y recinto receptor (1-10).

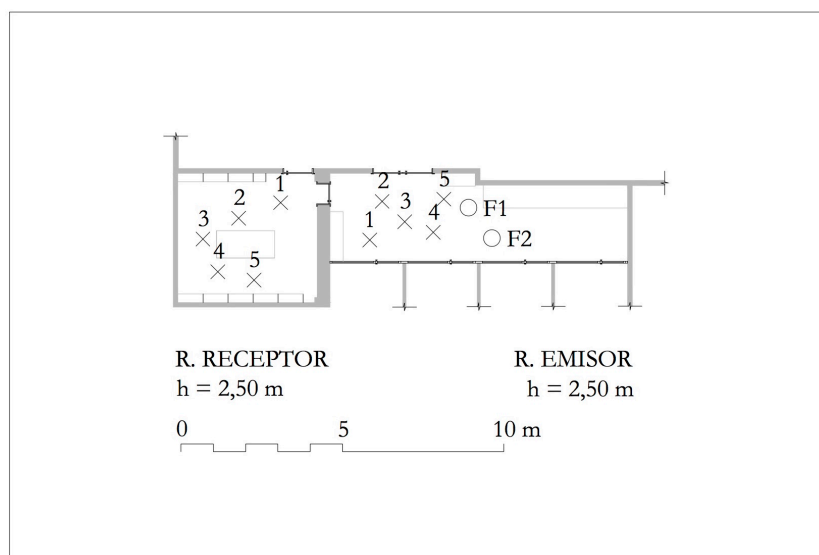


Fig. 6.9: Departamento. Puntos de excitación (F1 y F2) y puntos de muestreo espacial de la medición en el recinto emisor (1-5) y recinto receptor (1-5).

En las salas de juntas y en las aulas (figuras 6.7 y 6.8), los puntos de medición 1-6 en el recinto emisor, y 1-5 en el receptor, corresponden a la excitación con la fuente en la posición F1; los demás puntos corresponden a la fuente en la posición F2. En el departamento (Fig. 6.9), dado el área reducido de los recintos, se mide en las posiciones 1-5, en el recinto emisor y receptor, para cada posición de fuente F1 y F2.

A fin de comparar los resultados entre diferentes métodos de medición en los mismos recintos de ensayo, se determina la diferencia de niveles D para cada posición de fuente, sin aplicar la normalización referente a los descriptores D_n (diferencia de nivel normalizada), D_{nT} (diferencia de nivel estandarizada) o R' (índice de reducción sonora aparente). Al final de cada medición, se realiza un promedio energético de la diferencia de nivel correspondiente a cada posición de fuente, para determinar un resultado único expresado en bandas de frecuencias de tercios de octava.

En este estudio experimental, no se adopta el procedimiento de medida a bajas frecuencias en ninguno de los casos, puesto que los recintos no presentan un volumen suficientemente pequeño que justifique tal procedimiento.

6.3.2 Método de la función de transferencia

En este método, las posiciones de fuente y de micrófono son iguales a las del método clásico, que se indican en el apartado anterior (6.3.1), en cada uno de los tres casos de estudio ilustrados en las figuras 6.7 a 6.9.

Aunque para determinar la diferencia de niveles D a través del método de la función de transferencia no es necesario conocer la respuesta al impulso en niveles absolutos – interesa más bien calcular la diferencia de niveles entre la RIR del recinto emisor y receptor – se ha realizado antes de cada medición una calibración por defecto del micrófono empleado por el REW, usando

como referencia un ruido rosa generado por el *software* y la medida de nivel de presión instantáneo (SPL) del sonómetro analizador SOLO con ponderación frecuencial C, según las recomendaciones del programa^[43]. También se ha calibrado la respuesta dinámica de la interfaz de audio, a través del procedimiento por defecto que realiza el REW.

El tiempo del barrido sinusoidal exponencial y el rango de frecuencias que se mide – o sea, la frecuencia inicial y final del barrido – se pueden configurar antes de una medición de la RIR con el *software* REW (Fig. 6.10). En todos los casos de estudio, se mide la RIR con un barrido sinusoidal exponencial de 23,8 s (1M), en el rango desde 30 a 6000 Hz, teniendo en cuenta que las bandas de frecuencia de 50 Hz y 5kHz contienen frecuencias por encima y por debajo de sus respectivas frecuencias centrales de referencia. Al mover los equipos desde el recinto emisor hacia el receptor, se debe prestar atención para no modificar la ganancia del amplificador de potencia de la fuente sonora, que se ajusta en la interfaz de audio.

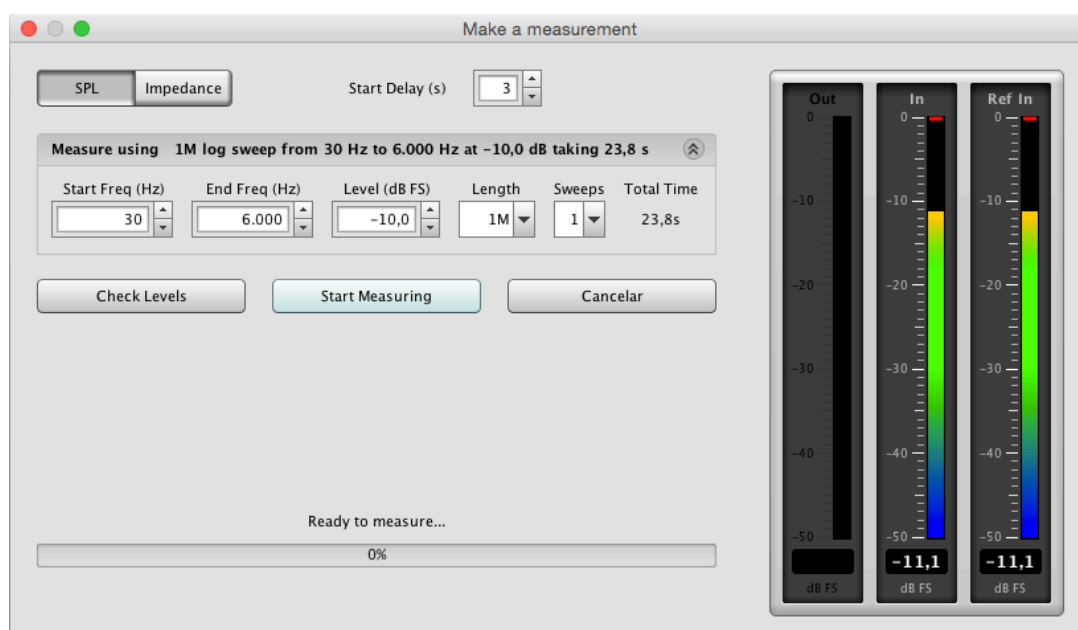


Fig. 6.10: REW (Room EQ Wizard). Opciones del programa para la configuración de los parámetros del barrido sinusoidal exponencial que se usa para excitar la sala y calcular la RIR: frecuencia inicial [Hz], frecuencia final [Hz], nivel de referencia [dB FS], periodo del barrido [s | bytes] y la cantidad de muestras de barrido por medición [adimensional].^[41]

La recomendación principal durante la medición con el barrido sinusoidal es evitar realizar movimientos para no interferir en el campo sonoro de la sala.^[4] En la Fig. 6.11 se puede observar el resultado de una RIR en función de la frecuencia, obtenida con el programa en el rango de frecuencias desde 30 Hz a 6 kHz:

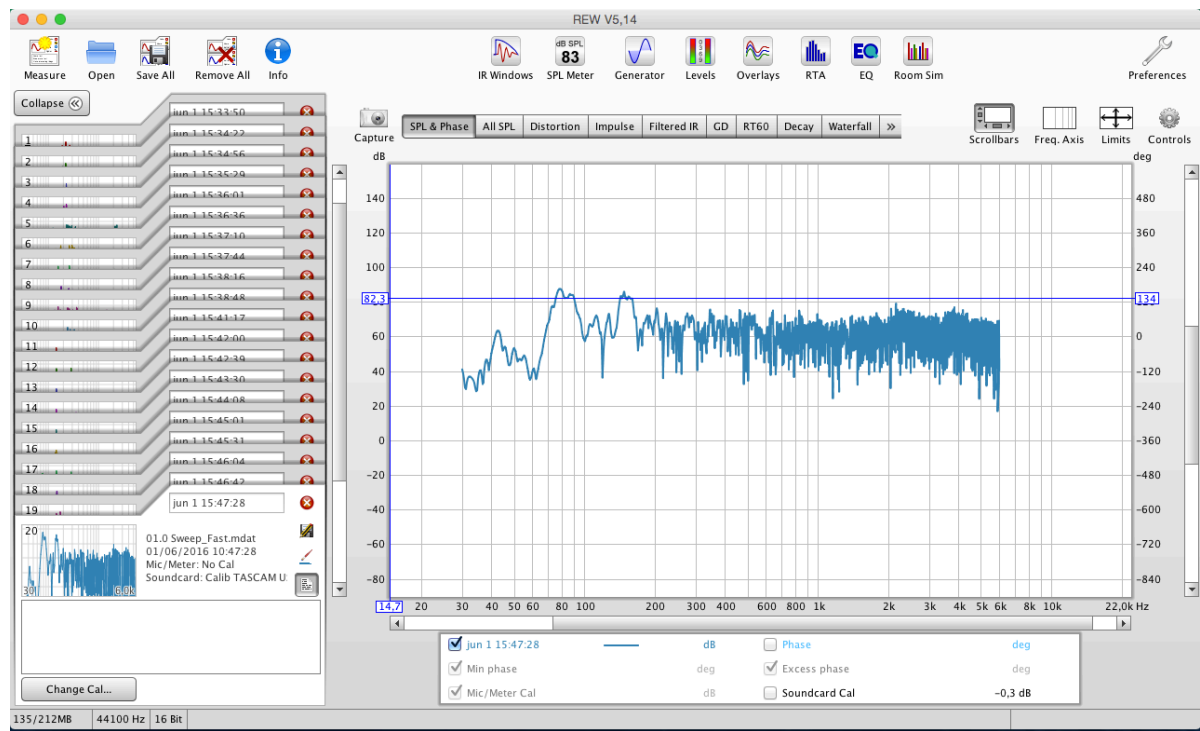


Fig. 6.11: REW (Room EQ Wizard). Interfaz del software y resultado de la medición de una RIR en un rango de frecuencias desde 30 Hz a 6 kHz.^[41]

Cuando se mide la RIR en los puntos de muestreo espacial predeterminados en el recinto emisor y receptor, se pueden visualizar todos los resultados (Fig. 6.12) y realizar las siguientes operaciones matemáticas en el conjunto de datos en función de la frecuencia: suavizado por bandas de frecuencia, sumas y restas logarítmicas, promedios, etc.

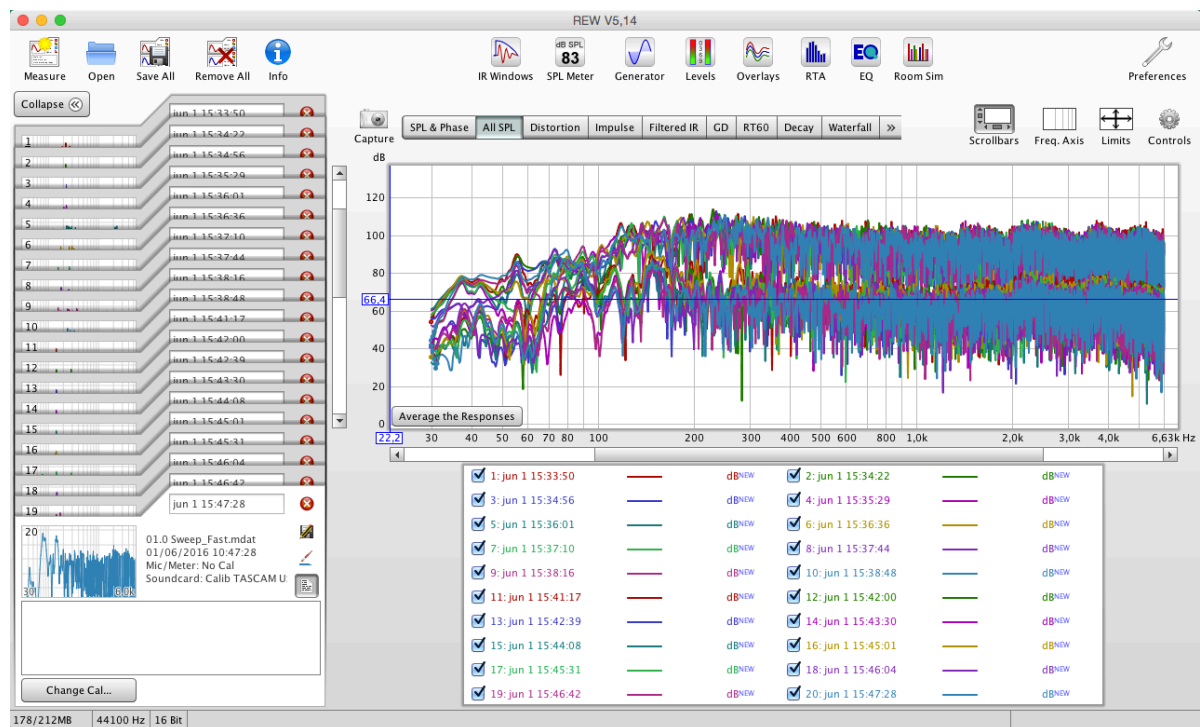


Fig. 6.12: REW (Room EQ Wizard). Interfaz del software y visualización de un conjunto de 20 resultados de la RIR de un par de recintos adyacentes, en un rango de frecuencias desde 30 Hz a 6 kHz: las mediciones 1-10 corresponden al promedio espacial en el recinto emisor, y las demás al promedio en el recinto receptor.^[41]

A partir de la RIR en función de la frecuencia, obtenida con el REW en cada punto del promedio espacial en el recinto emisor y receptor, se aplica un suavizado al conjunto de datos correspondiente a la expresión de los resultados en bandas de tercio de octava, que se exportan a un archivo de texto. Aunque el *software* REW suaviza la curva de una RIR para su expresión en bandas de tercios de octava, éste exporta los datos numéricos en bandas de doceavos de octava. Estos resultados se pueden convertir en bandas de tercios de octava mediante una hoja de cálculo Excel, donde se suman logarítmicamente las bandas de un doceavos de octava correspondientes al ancho de banda de un tercio de octava, según las definiciones de la norma internacional IEC 61260 sobre filtros de bandas de octava y bandas de una fracción de octava.^[44]

Por último, se diseña una hoja de cálculo Excel, con la cual, a partir de los resultados numéricos de las RIR correspondientes a los promedios espaciales de un ensayo, se puede obtener la diferencia de niveles D entre recintos, en bandas de frecuencia, según el procedimiento de cálculo presentado en el apartado 4.5.4 de este trabajo.

6.3.3 Método de la señal impulsiva

En este método descrito por Deželak et al.^[3], basado en la norma ISO 16283-1, se adoptan las mismas posiciones de ensayo del método clásico, pero se invierten los puntos de fuente y micrófono, según se ilustra en las figuras 6.13 a 6.15:

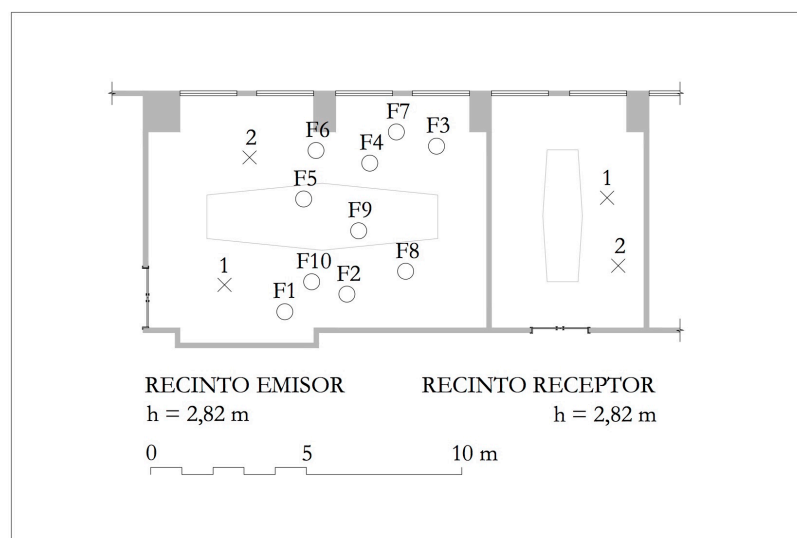


Fig. 6.13: Salas de juntas. Puntos de excitación en el recinto emisor (F1-10), y puntos de medición (1 y 2) en el recinto emisor y receptor.

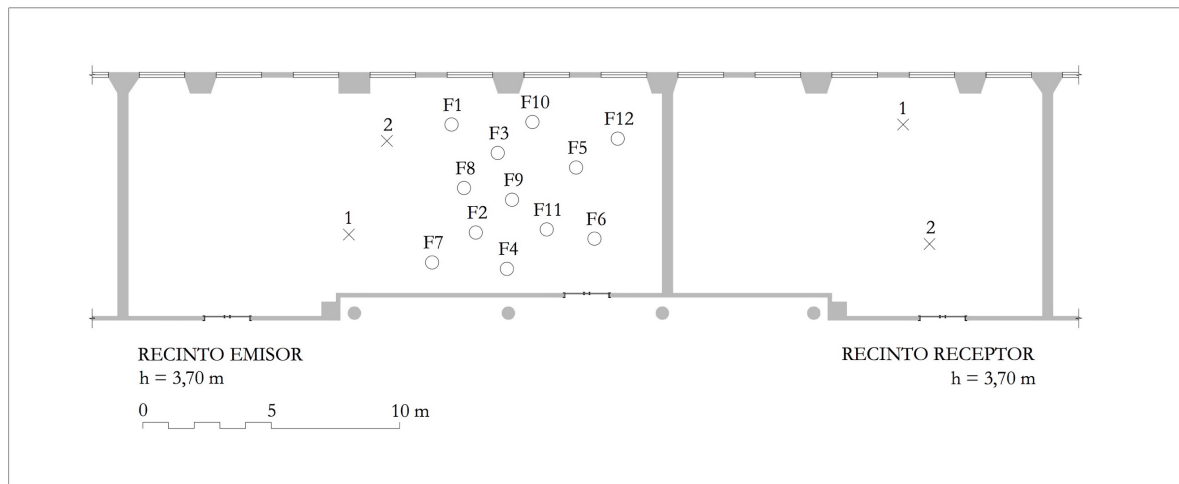


Fig. 6.14: Aulas. Puntos de excitación en el recinto emisor (F1-12), y puntos de medición (1 y 2) en el recinto emisor y receptor.

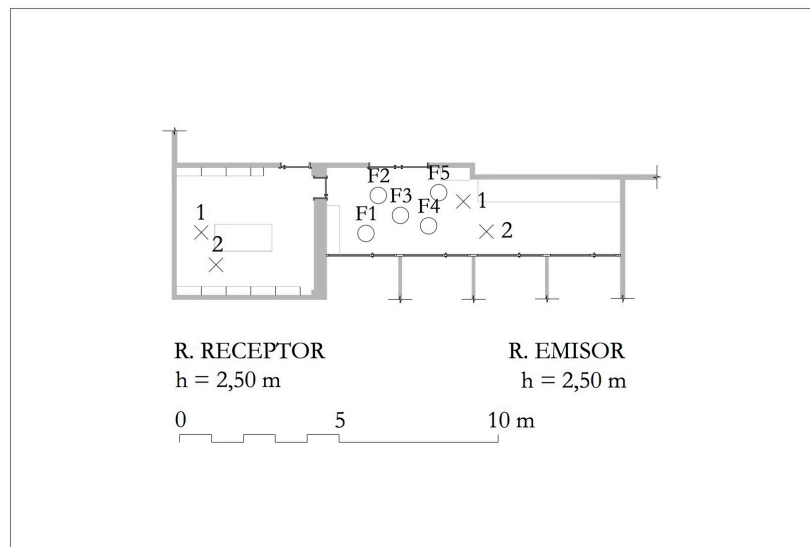


Fig. 6.15: Departamento. Puntos de excitación (F1-5), y puntos de medición (1 y 2) en el recinto emisor y receptor.

En las salas de juntas, el punto de medición 1 en el recinto emisor y receptor corresponde a los puntos de excitación F1 a F5; los demás puntos de excitación (F6 a F10) corresponden al micrófono en la posición 2. En las aulas, el punto de medición 1 en el recinto emisor y receptor corresponde a los puntos de excitación F1 a F6; los demás puntos de excitación (F7 a F12) corresponden al micrófono en la posición 2. En el departamento, dado el área reducida de los recintos, se excita con la señal impulsiva en las posiciones F1 a F5 en el recinto emisor, para medir en ambas posiciones de micrófono, en el recinto emisor y receptor.

Según el método de Deželak et al.^[3] se mide el Leq,T en un tiempo suficiente para realizar la secuencia de disparos correspondiente a cada posición de micrófono. En el procesamiento de datos, se convierte el nivel equivalente obtenido a SEL, según la Ec. 5.1 del apartado 5.2.1 de este trabajo, y de acuerdo con el periodo correspondiente a la medida de Leq,T para cada posición de micrófono. Con este procedimiento, se realizan mediciones con una pistola de fogeo y globos.

Además de este método de medición por defecto, que determina un valor de nivel de exposición sonora para una secuencia de disparos, se comparan los resultados midiendo cada punto por separado. Como propuesta original del trabajo experimental, se busca verificar si el ruido de fondo de la sala o el desplazamiento del operador de la pistola influyen en la medición que se realiza a partir de una secuencia de disparos. También se busca comparar los resultados de la inversión de los puntos de fuente y micrófono que propone el método descrito por Deželak et al.^[3], basado en la reciprocidad energética de la ecuación de Green del espacio libre armónico, con las posiciones de excitación y medición que recomienda la norma ISO 16283-1, para verificar la validez de esta inversión en los ensayos de aislamiento acústico. Se mide entonces el nivel equivalente Leq,T de 6 segundos, de cada disparo por separado.

Se debe resaltar la rapidez del ensayo de este método al medir las señales impulsivas, si se compara con los métodos clásico y de la función de transferencia.

6.3.4 Tabla resumen de los ensayos realizados

En la Tabla 6.1 se resumen las características y la cantidad de ensayos realizados en cada caso de estudio:

Tabla 6.1: Ensayos realizados en el estudio experimental, según la nomenclatura adoptada.

CASO DE ESTUDIO	MÉTODO CLÁSICO	MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA			MÉTODO DE LA SEÑAL IMPULSIVA			
	Clásico 16283-1	FT 50-5k 12s	FT 50-5k 24s	FT 50-200 24s	Impulsivo	Impulsivo Dividido	Impulsivo 16283-1	Impulsivo Globos
Salas de Juntas	■ ■		■	■	■ ■	■	■	
Aulas	■		■	■	■		■	
Departamento	■	■	■				■	■

Para facilitar la identificación del parámetro que se mide y del procedimiento adoptado, se nombran los métodos de medida según la nomenclatura que se describe a continuación:

- **(Método) Clásico 16283-1:** Ensayo realizado según el procedimiento por defecto de la norma ISO 16283-1, sin las mediciones en los rincones, del procedimiento a bajas frecuencias. Este ensayo se realiza en todos los casos de estudio, y se mide el $Leq,15s$ en bandas de tercio de octava desde 50 Hz a 5 kHz.

- **(Método) FT 50-5k 12s:** Ensayo según el método de la función de transferencia, que mide la respuesta impulsiva en un rango de bandas de frecuencia de tercio de octava desde 50 Hz a 5 kHz, en un periodo de barrido exponencial de 12 segundos en cada punto.
- **(Método) FT 50-5k 24s:** Ensayo según el método de la función de transferencia, que mide la respuesta impulsiva en un rango de bandas de frecuencia de tercio de octava desde 50 Hz a 5 kHz, en un periodo de barrido exponencial de 24 segundos en cada punto. Este ensayo se realiza en todos casos de estudio.
- **(Método) FT 50-200 24s:** Ensayo según el método de la función de transferencia, que mide la respuesta impulsiva en un rango de bandas de frecuencia de tercio de octava a medias-bajas frecuencias, desde 50 Hz a 200 Hz, en un periodo de barrido exponencial de 24 segundos en cada punto. Este ensayo se realiza para comparar su precisión en relación al ensayo anterior 'FT 50-5k 24s'.
- **(Método) Impulsivo:** Ensayo según el método de la señal impulsiva, de acuerdo con el procedimiento que se describe en Deželak et al.^[3]. Se mide el Leq,T en un periodo suficiente para realizar una secuencia de disparos con la pistola de fogeo por posición de micrófono, en un rango de bandas de frecuencia de tercio de octava desde 50 Hz a 5 kHz. Las medidas se convierten a nivel de exposición sonora SEL, de acuerdo con el tiempo de promedio T de cada medición.
- **(Método) Impulsivo Dividido:** Ensayo según el método de la señal impulsiva, de acuerdo con el procedimiento que se describe en Deželak et al.^[3], pero midiendo cada punto de emisión por separado. Se mide el Leq,T en un periodo suficiente para realizar un disparo con la pistola de fogeo por posición de micrófono, en un rango de bandas de frecuencia de tercio de octava desde 50 Hz a 5 kHz. Las medidas se convierten a nivel de exposición sonora SEL, de acuerdo con el tiempo de promedio T de cada medición.
- **(Método) Impulsivo 16283-1:** Ensayo semejante al descrito por Deželak et al.^[3], pero siguiendo los criterios de la ISO 16283-1 en cuanto al muestreo de puntos de excitación y medición de la sala. Este ensayo se realiza en todos casos de estudio.
- **(Método) Impulsivo Globos:** Ensayo idéntico al denominado 'Impulsivo', pero usando la explosión de globos para excitar acústicamente el recinto emisor.

La identificación de cada tipo de ensayo, de acuerdo con el método y sus respectivas variaciones, se utilizan en el Capítulo 7, donde se presentan y se discuten los resultados.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los apartados 7.1 a 7.3 de este capítulo, se analizan los resultados de los tres casos de estudio presentados en el capítulo 6, de acuerdo con los métodos descritos y resumidos en el apartado 6.3.4. Dado el gran número de datos recogido, se adjuntan en el Anexo A los resultados detallados de cada medida realizada. Algunas imágenes de los ensayos realizados se presentan en el Anexo B. La nomenclatura que se emplea para referirse a las variaciones de los tres métodos de medición – clásico, de la función de transferencia y de la señal impulsiva – aparece en la memoria en cursiva y entre comillas simples, y se define en el apartado 6.3.4 (por ejemplo, '*Método Impulsivo 16283-1*').

Los apartados 7.4 a 7.7 se dedican a mostrar otros resultados relacionados con los datos obtenidos y con la puesta a punto de los métodos de ensayo: la atenuación por divergencia geométrica para cada tipo de fuente, la desviación típica de los niveles promedios, la ecualización de la señal de ruido aleatorio en el método clásico, y el periodo del barrido sinusoidal en el método de la función de transferencia.

Las autoverificaciones con el calibrador, realizadas antes y después de una secuencia de mediciones con el sonómetro analizador en todos los ensayos de este estudio experimental, resultan en un error máximo de $-0,2$ dB en relación al nivel de presión sonora de referencia. Puesto que las medidas presentadas a continuación no tienen como fin la caracterización del aislamiento de los cerramientos, sino que buscan, más bien, comparar los resultados obtenidos por los diferentes métodos de medición, no se aplican las correcciones por ruido de fondo en las medidas realizadas en el recinto receptor, según los criterios de la norma ISO 16283-1.

7.1 Caso de Estudio 1: Diferencia de Niveles *D* entre Salas de Juntas

En este primer caso de estudio, se comparan los resultados obtenidos por el '*Método Clásico 16283-1*' con los resultados que corresponden a las tres variaciones del método de la señal impulsiva presentadas en el capítulo 6 (*Impulsivo*, *Impulsivo Dividido* e *Impulsivo 16283-1*). La comparación se observa en la Fig. 7.1. Las mediciones realizadas por el '*Método Clásico 16283-1*' y por el '*Método Impulsivo*' descrito por Deželak et al.^[3], se realizaron dos veces en días diferentes, y por ello que aparecen como (1) y (2) en ambos casos.

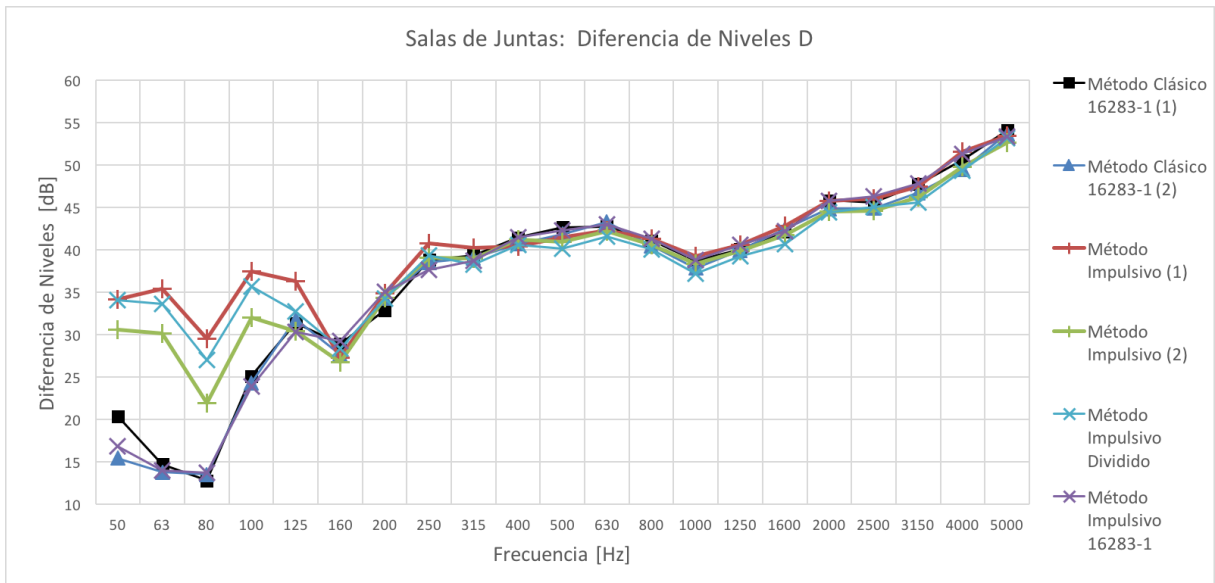


Fig. 7.1: Salas de juntas. Comparación de la Diferencia de Niveles D – Método clásico y Métodos de la señal impulsiva.

Al comparar los resultados de las variaciones del método de la señal impulsiva entre sí, se observa que, por debajo de la banda de 160 Hz, existe una significativa incoherencia entre los resultados y una diferencia de hasta 20 dB en relación a los resultados del método clásico. A partir de la banda de 160 Hz, la coherencia entre métodos es satisfactoria, con una diferencia máxima de 4 dB entre los métodos.

En este primer grupo de resultados de ensayos en las salas de juntas se observa que la elevada dispersión de las medidas a bajas frecuencias se puede deber a que el método de Deželak et al. reduce el número de posiciones de micrófono a dos posiciones en cada recinto frente a las 10 empleadas por el método clásico. Este fenómeno se estudiará detenidamente más adelante.

Con el fin de analizar el efecto de los distintos procedimientos de muestreo espacial, las figuras 7.2 a 7.5 muestran los promedios del nivel de presión sonora en ambos recintos, correspondientes a las cuatro medidas *Impulsivas* representadas en la gráfica anterior (Fig. 7.1). Se observa que los resultados correspondientes al '*Método Impulsivo*' (figuras 7.2 y 7.3) no muestran las curvas de las medidas en cada punto de excitación dado que el procedimiento se basa en la medición de una secuencia de disparos, en cada punto de micrófono en el recinto emisor y receptor.

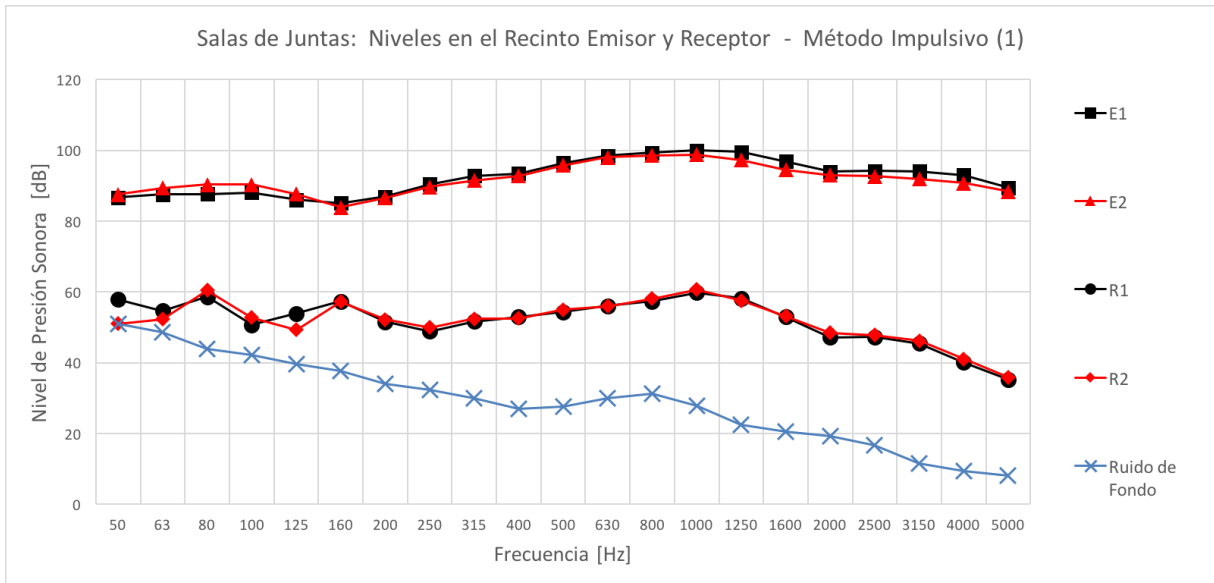


Fig. 7.2: Salas de juntas. Método Impulsivo (1): Promedios en el recinto emisor y receptor. E1 y E2 son las medidas de una secuencia de cinco disparos tomadas en la posición de micrófono 1 y 2 en el recinto emisor, respectivamente. R1 y R2 son las medidas de una secuencia de cinco disparos tomadas en la posición de micrófono 1 y 2 en el recinto receptor, respectivamente.

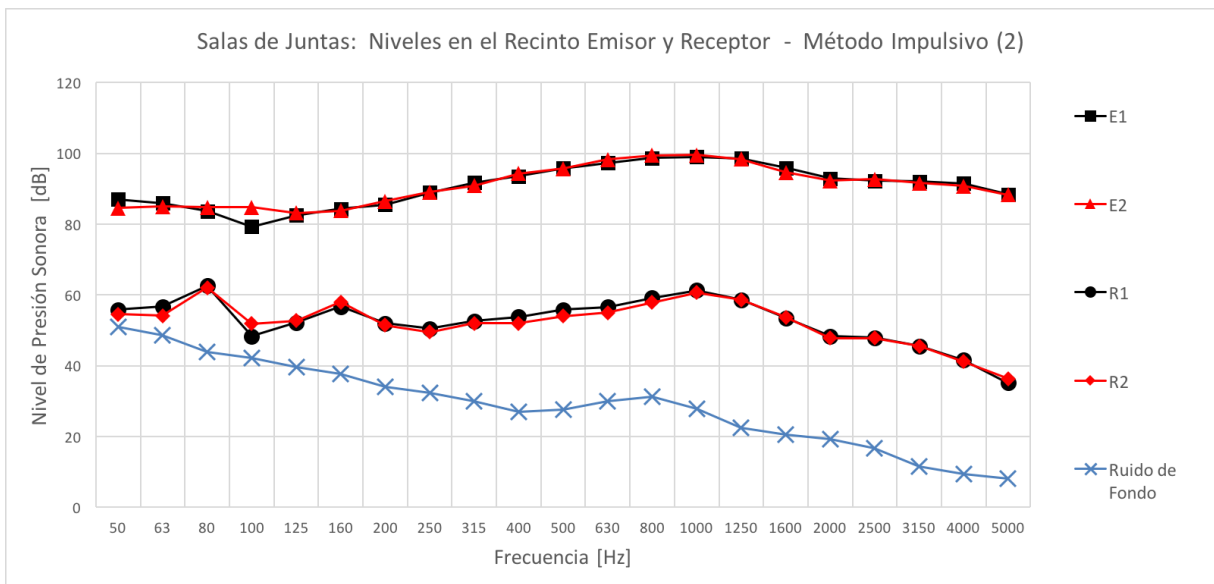


Fig. 7.3: Salas de juntas. Método Impulsivo (2): Promedios en el recinto emisor y receptor. E1 y E2 son las medidas de una secuencia de cinco disparos tomadas en la posición de micrófono 1 y 2 en el recinto emisor, respectivamente. R1 y R2 son las medidas de una secuencia de cinco disparos tomadas en la posición de micrófono 1 y 2 en el recinto receptor, respectivamente.

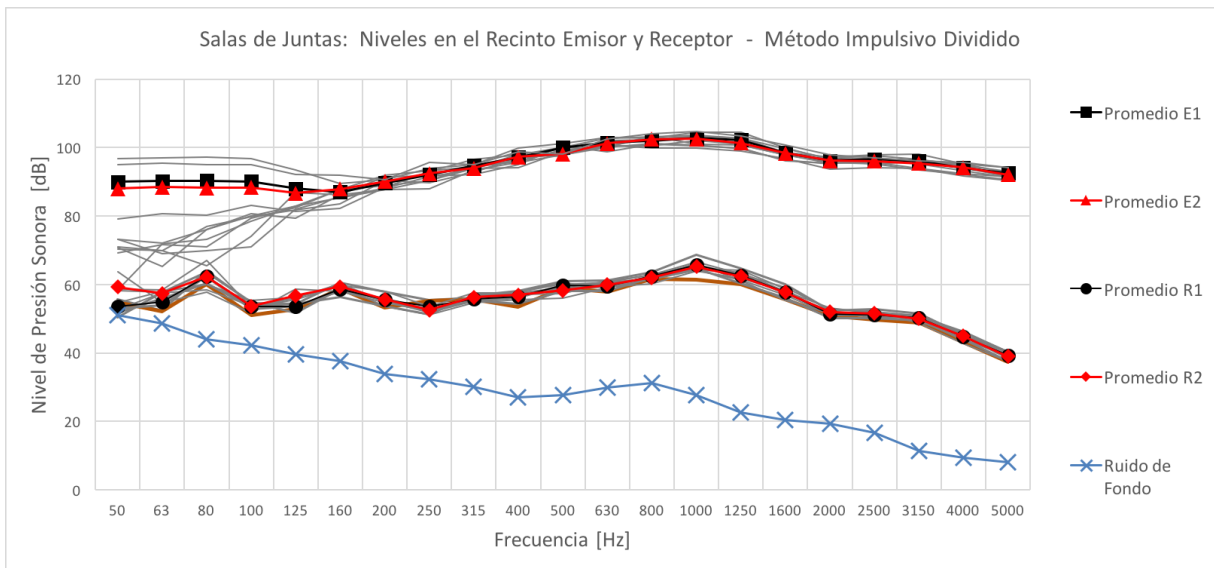


Fig. 7.4: Salas de juntas. Método Impulsivo Dividido: Promedios en el recinto emisor y receptor. E1 y E2 son, respectivamente, los promedios de las medidas correspondientes a las posiciones de micrófono 1 y 2 en el recinto emisor. R1 y R2 son, respectivamente, los promedios de las medidas correspondientes a las posiciones de micrófono 1 y 2 en el recinto receptor.

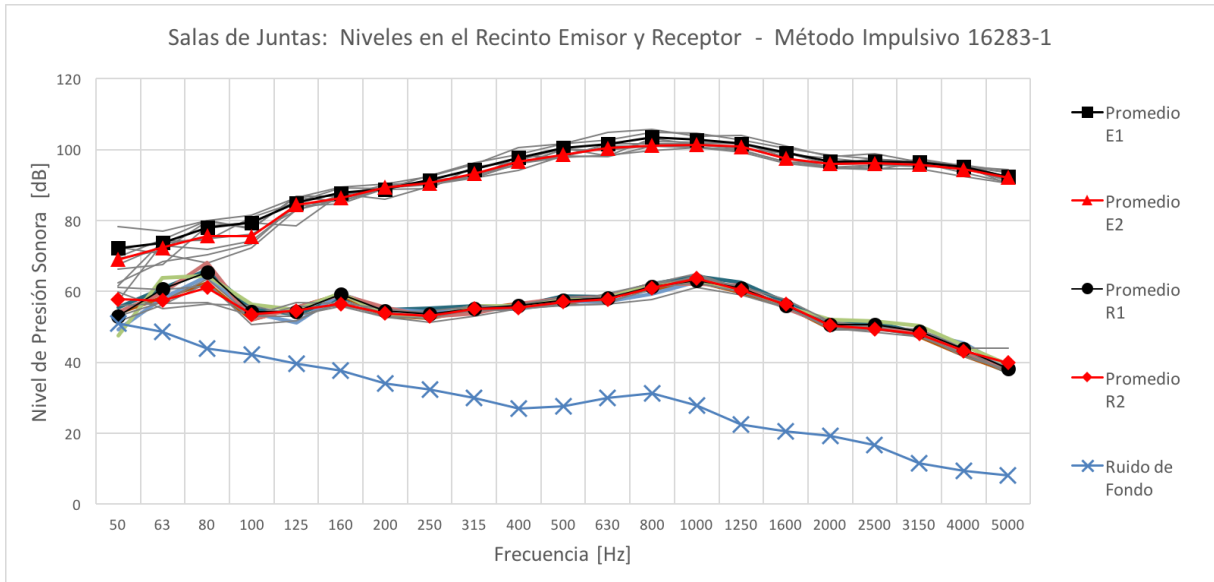


Fig. 7.5: Salas de juntas. Método Impulsivo 16283-1: Promedios en el recinto emisor y receptor. E1 y E2 son, respectivamente, los promedios de las medidas correspondientes a las posiciones de fuente F1 y F2 en el recinto emisor. R1 y R2 son, respectivamente, los promedios de las medidas correspondientes a las posiciones de fuente F1 y F2 en el recinto receptor.

En las gráficas de las figuras 7.2 a 7.5, la magnitud de las curvas relativas a las mediciones y a los promedios calculados con el método de la señal impulsiva es el nivel de presión sonora equivalente (Leq,T), tal y como se ha medido en el ensayo. De hecho, si todas las mediciones de Leq,T de los sucesos sonoros impulsivos, en un ensayo con el método de la señal impulsiva, se realizan con un mismo tiempo de promedio temporal T , la conversión de las medidas a nivel de exposición SEL (apartado 5.1.1 y 5.3) es redundante para el cálculo final de la diferencia de nivel D entre recintos. Por este motivo, puesto que todos los ensayos con el método de la señal impulsiva que se presentan en este estudio experimental se han realizado midiendo el nivel equivalente de presión sonora Leq,T con un mismo periodo de promedio, de acuerdo con las características de cada variación del método, no es necesaria la conversión de los resultados a SEL.

Los resultados que se presentan en las figuras 7.2 a 7.5 muestran que los promedios calculados en el recinto receptor para cada posición de fuente (*Promedio R1* y *Promedio R2*), en los cuatro ensayos realizados con este método de la señal impulsiva, presentan una coherencia satisfactoria en las bandas superiores a 50 Hz. No obstante, la dispersión de las medidas realizadas en el recinto emisor con el muestreo propuesto por Deželak et al. es alto, y se evidencia en los resultados del '*Método Impulsivo Dividido*' (Fig. 7.4), por debajo de la banda de 160 Hz. En este método "dividido", en el cual se separan las mediciones que en el '*Método Impulsivo*' se realizan en secuencia, se observa la existencia de dos medidas cuyos resultados son significativamente más altos en las medias-bajas frecuencias, y que corresponden a los puntos de excitación F1 y F6 (Fig. 6.13), medidos con el sonómetro analizador en los puntos 1 y 2, respectivamente. Se debe resaltar que estas posiciones de micrófono son los puntos más cercanos a sus respectivas posiciones de fuente y que se sitúan relativamente cerca de una pared.

Al realizar, en el método de la señal impulsiva, un muestreo espacial según los requisitos de la ISO 16283-1 (Fig. 7.5), se observa una disminución de la dispersión de las medidas en este rango de frecuencias en el recinto emisor, lo cual refuerza la idea de que el muestreo del '*Método Impulsivo 16283-1*' es el más representativo del campo sonoro, tal y como se esperaba, ya que emplea un mayor número de puntos de medida no correlacionados.

Un análisis conclusivo de la comparación entre métodos de muestreo espacial de la medición con ruido impulsivo sólo sería posible con una gran muestra de ensayos. Aun así, se puede deducir a la luz de los conceptos vistos en el capítulo 2 de este trabajo – en relación a la excitación y propagación del sonido en espacios cerrados – que la inversión de los puntos de excitación y medición que proponen Deželak et al., y que se emplea en el '*Método Impulsivo*' y '*Método Impulsivo Dividido*', disminuye el número de mediciones no correlacionadas en las medias-bajas frecuencias, puesto que el muestreo del campo acústico modal se reduce a dos puntos por recinto. Aunque este método aumente proporcionalmente el número de posiciones de excitación, se ha visto anteriormente que la posición de la fuente no altera significativamente la formación de los modos propios de la sala, que predominan por debajo de la frecuencia de corte de la sala. A la vista de los resultados de las medidas en el recinto emisor con el '*Método Impulsivo Dividido*', se verifica que la dispersión de las medidas es significativa por debajo de la frecuencia de corte, que en este recinto es aproximadamente igual a 100 Hz.

A partir de los resultados obtenidos con las variaciones del método de la señal impulsiva que se llevaron a cabo en este estudio experimental, y con base en los conceptos teóricos

expuestos anteriormente, se puede considerar que los resultados obtenidos con el ‘*Método Impulsivo 16283-1*’ son los que mejor se aproximan a los resultados obtenidos con los métodos clásico y de la función de transferencia, que realizan un promedio espacial de puntos de medición de acuerdo con la norma ISO 16283-1. En la Fig. 7.6 se comparan los resultados entre todos estos métodos de medición:

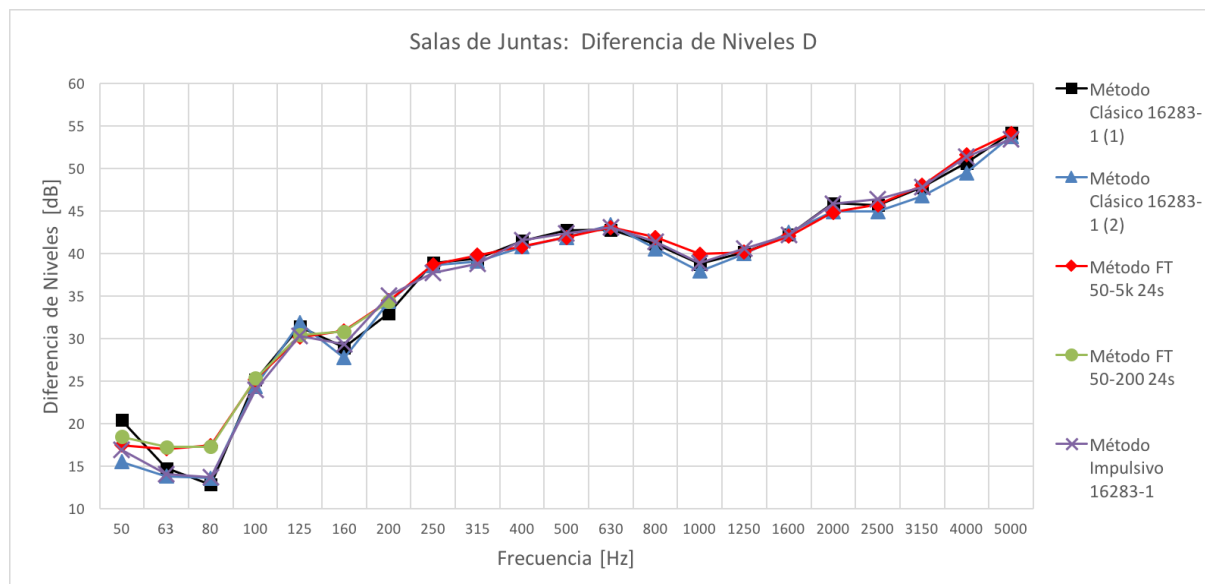


Fig. 7.6: Salas de juntas. Comparación de la Diferencia de Niveles D entre métodos.

Es evidente la coherencia del resultado del ‘*Método Impulsivo 16283-1*’ con el de los métodos clásico y de la función de transferencia, tal y como se muestra en la Fig. 7.6. El resultado del ‘*Método Impulsivo 16283-1*’ se aproxima más al del ‘*Método Clásico 16283-1*’ en las bajas frecuencias, si se compara con el método de la de la función de transferencia. La coherencia entre todos los métodos es alta por encima de los 80 Hz, con una diferencia de niveles máxima de aproximadamente 4 dB, en la banda de 160 Hz. En las bajas frecuencias, por debajo de los 100 Hz, se observa una diferencia de resultados entre el método clásico y de la función de transferencia, en sus dos variaciones, de aproximadamente 5 dB.

Los resultados de las medidas con el método de la función de transferencia señalan que, en este caso de estudio, no existe una diferencia significativa entre los resultados obtenidos con un barrido más prolongado en las medias-bajas frecuencias y un barrido completo en todo el rango de frecuencias de interés (curvas verde y roja respectivamente en la Fig. 7.6).

A partir de los conceptos vistos en la revisión teórica de los capítulos 2 y 3, y a la vista de los resultados anteriores, se considera que el método de muestreo espacial de la medición según la norma ISO 16283-1 es el más adecuado y por tanto el ‘*Método Impulsivo 16283-1*’ es el que permite obtener un mayor número de muestras no correlacionadas del campo modal en un recinto acústicamente excitado.

7.2 Caso de Estudio 2: Diferencia de Niveles D entre Aulas

En esta serie de ensayos realizados en las aulas, se compara inicialmente el método clásico con los métodos de la función de transferencia en todo el rango de frecuencias de interés (*'Método FT 50-5k 24s'*), y sólo en medias-bajas frecuencias con el mismo tiempo de barrido que el primer método (*'Método FT 50-200 24s'*). A continuación, se ha medido y comparado con el método de la señal impulsiva usando las variaciones del método denominadas *'Método Impulsivo'* y *'Método Impulsivo 16283-1'*. Todos los resultados de la diferencia de niveles D entre recintos, según los distintos métodos de medida empleados, se presentan en la Fig. 7.7:

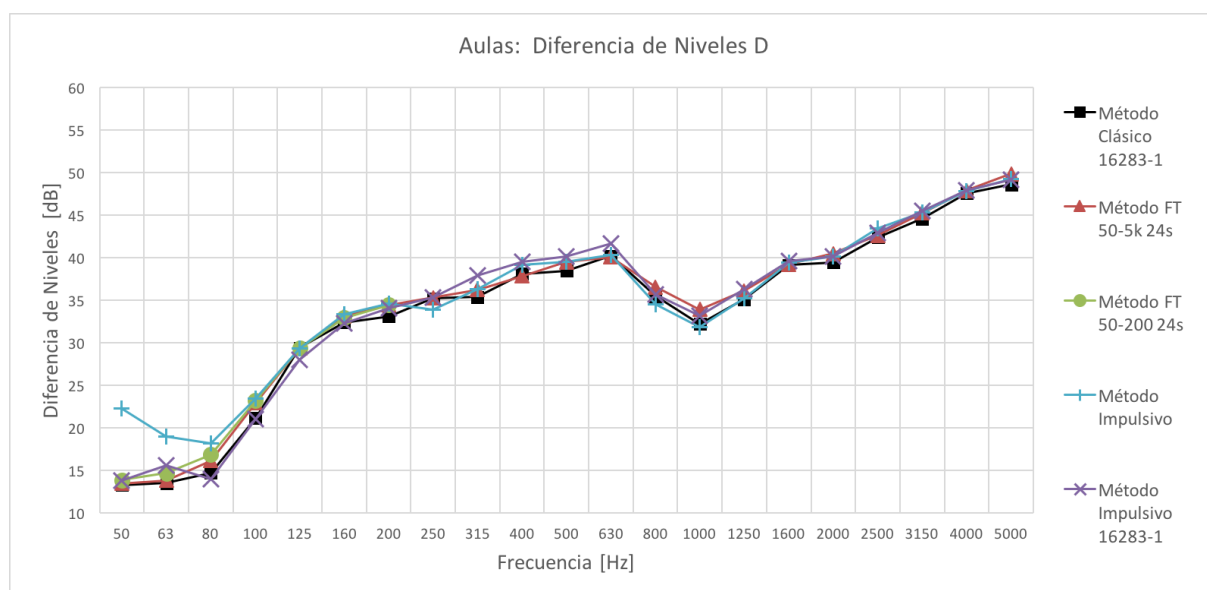


Fig. 7.7: Aulas. Comparación de la Diferencia de Niveles D entre métodos.

Las curvas representadas en la gráfica de la Fig. 7.7 indican una coherencia satisfactoria, por encima de los 80 Hz, entre todos los métodos de medida empleados, encontrando una diferencia de niveles máxima de aproximadamente 3 dB en alguna banda de frecuencia.

En este caso de estudio, la frecuencia de corte del recinto emisor es de aproximadamente 63 Hz. Se verifica que, cerca de la frecuencia de corte (bajas frecuencias), la incoherencia del resultado correspondiente al *'Método Impulsivo'* se acentúa, si se compara con el *'Método Impulsivo 16283-1'* y los demás métodos de medición. El *'Método Impulsivo 16283-1'*, de manera similar a lo ocurrido en el estudio anterior en las salas de juntas, presenta una mejor coherencia si se compara con los demás métodos de medición (clásico y de la función de transferencia).

En las gráficas siguientes se presentan los niveles de presión sonora promedio correspondientes a las mediciones con señal impulsiva, para cada posición de micrófono (*'Método Impulsivo'*, Fig. 7.8) y para cada posición de fuente (*'Método Impulsivo 16283-1'*, Fig. 7.9):

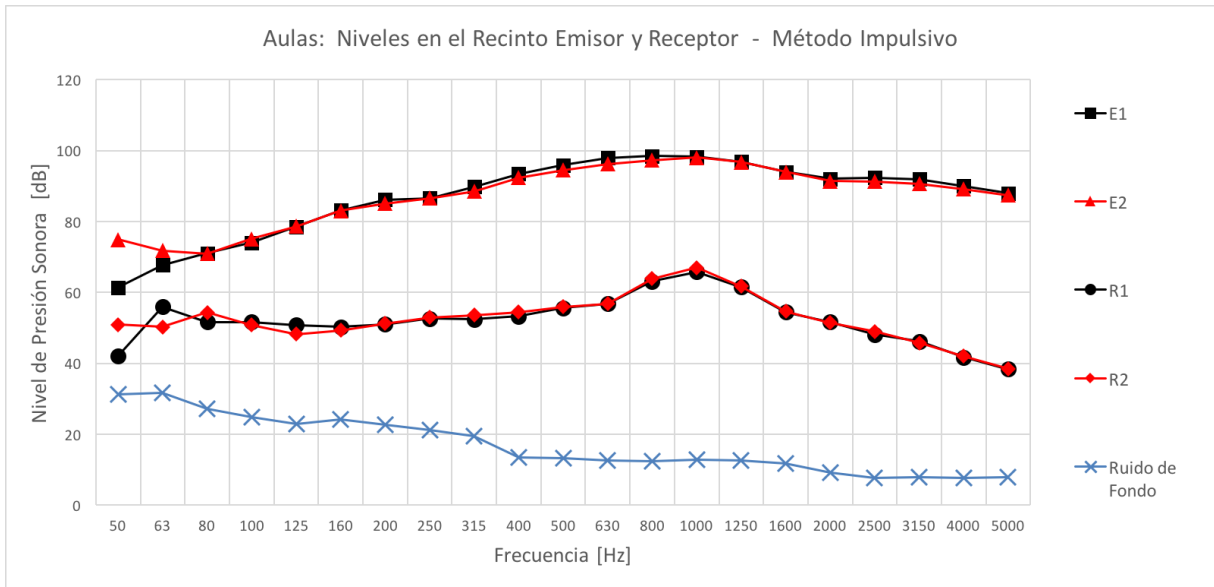


Fig. 7.8: Aulas. Método Impulsivo: Promedios en el recinto emisor y receptor. E1 y E2 son las medidas de una secuencia de disparos tomadas en la posición de micrófono 1 y 2 en el recinto emisor, respectivamente. R1 y R2 son las medidas de una secuencia de disparos tomadas en la posición de micrófono 1 y 2 en el recinto receptor, respectivamente.

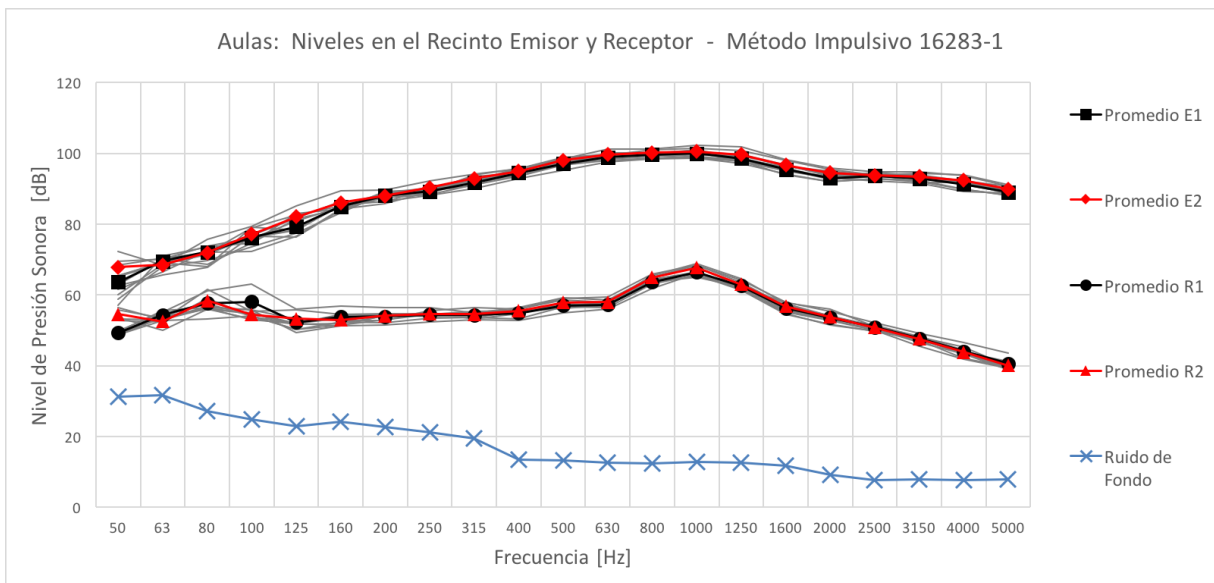


Fig. 7.9: Aulas. Método Impulsivo 16283-1: Promedios en el recinto emisor y receptor. E1 y E2 son, respectivamente, los promedios de las medidas correspondientes a las posiciones de fuente F1 y F2 en el recinto emisor. R1 y R2 son, respectivamente, los promedios de las medidas correspondientes a las posiciones de fuente F1 y F2 en el recinto receptor.

Al igual que en el caso de estudio anterior, se observa que a bajas frecuencias la divergencia entre los niveles promedios es menor con el ‘Método Impulsivo 16283-1’ (Fig. 7.9) que con el ‘Método Impulsivo’ (Fig. 7.8). En las bandas de 50 y 63 Hz, las diferencias observadas en este caso de estudio (Fig. 7.8) son algo mayores que en el caso de estudio anterior (figuras 7.2 y 7.3 ‘Método Impulsivo’ y figuras 7.4 y 7.5 ‘Método Impulsivo Dividido’). Sin embargo, sería necesario un gran número de muestras de estos ensayos, en los diferentes recintos, para identificar empíricamente las debilidades del ‘Método Impulsivo’ en los resultados a bajas frecuencias, cerca y por debajo de la frecuencia de corte del recinto emisor/receptor.

7.3 Caso de Estudio 3: Diferencia de Niveles D en el Departamento de Física Aplicada

En esta serie de ensayos realizados en el Departamento de Física Aplicada, se aplican las variaciones de los métodos de medición utilizadas en las aulas (caso de estudio 2), pero cambiando el ‘Método Impulsivo’ por el ‘Método Impulsivo Globos’, que es idéntico al primero salvo que utiliza la explosión de globos como señal de excitación; y se añade el ‘Método FT 50-5k 12s’, que mide con el método de la función de transferencia todo el rango de frecuencias de interés (50 Hz a 5 kHz) con un barrido sinusoidal más corto, de 12 segundos. Los resultados se presentan en la Fig. 7.10 a continuación:

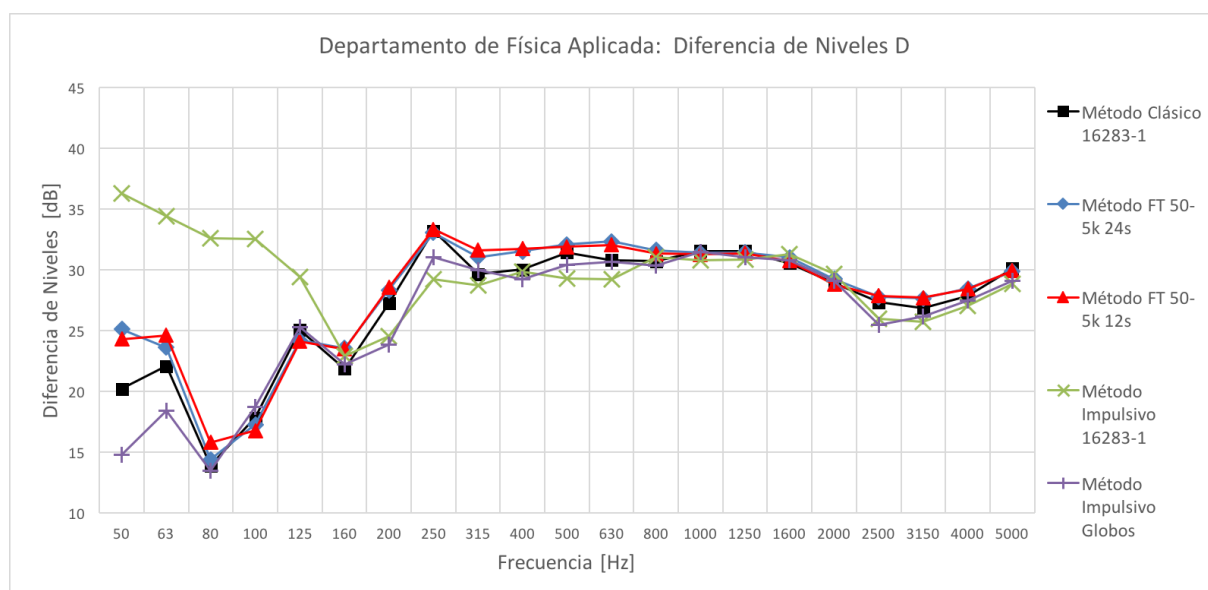


Fig. 7.10: Departamento de Física Aplicada. Comparación de la Diferencia de Niveles D entre métodos.

En el Departamento de Física Aplicada – cuyos volúmenes de los recintos son relativamente pequeños en comparación con aquellos ensayados anteriormente, y se aproximan más a la escala de un recinto de una vivienda típica – se puede verificar que no existe una diferencia significativa en los resultados con el método de la función de transferencia de barrido sinusoidal de 12 s (‘Método FT 50-5k 12s’), en comparación con un barrido más largo, de 24 s. En este caso de estudio, a diferencia de los demás, se observa que el resultado menos coherente en relación al conjunto de medidas es el del ‘Método Impulsivo 16283-1’. Aunque la coherencia entre los métodos clásico y de la función de transferencia es aceptable – con una diferencia máxima de niveles entre métodos de medida de 5 dB, en la banda de 50 Hz – la dispersión del conjunto de

métodos utilizados en esta serie de mediciones es elevada por debajo de la banda de 160 Hz, debido en este caso a los resultados de los ensayos efectuados con el método de la señal impulsiva.

Los promedios de los niveles de presión sonora correspondientes a los ensayos realizados con el método de la señal impulsiva, 'Método Impulsivo 16283-1' (Fig. 7.11) y 'Método Impulsivo Globos' (Fig. 7.12), se presentan a continuación:

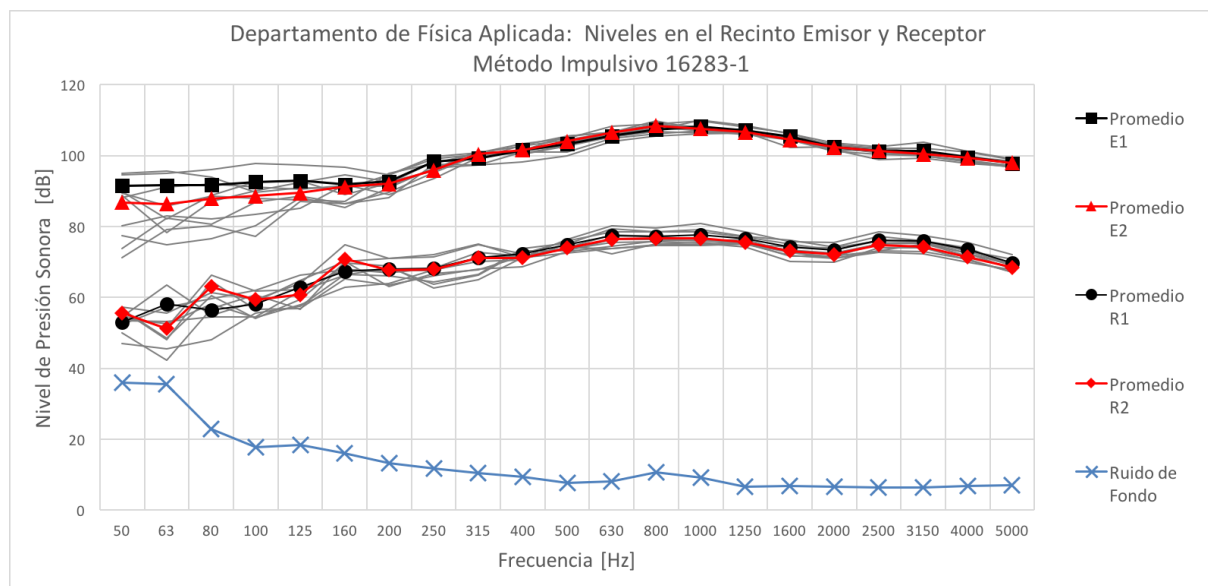


Fig. 7.11: Departamento de Física Aplicada. Método Impulsivo 16283-1: Promedios en el recinto emisor y receptor. E1 y E2 son, respectivamente, los promedios de las medidas correspondientes a las posiciones de fuente F1 y F2 en el recinto emisor. R1 y R2 son, respectivamente, los promedios de las medidas correspondientes a las posiciones de fuente F1 y F2 en el recinto receptor.

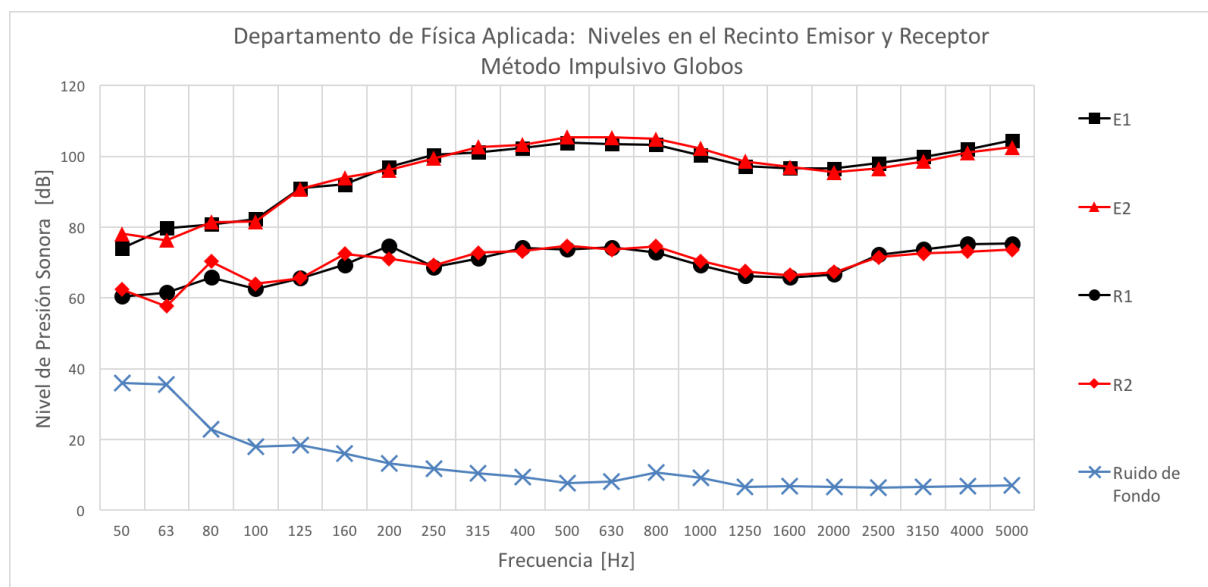


Fig. 7.12: Departamento de Física Aplicada. Método Impulsivo Globos: Promedios en el recinto emisor y receptor. E1 y E2 son las medidas de una secuencia de explosiones tomadas en la posición de micrófono 1 y 2 en el recinto emisor, respectivamente. R1 y R2 son las medidas de una secuencia de explosiones tomadas en la posición de micrófono 1 y 2 en el recinto receptor, respectivamente.

En la gráfica de la Fig. 7.11 se observa la alta dispersión de las medidas en las medias-bajas frecuencias, tanto en el recinto emisor como en el recinto receptor, y una diferencia máxima de niveles entre métodos de medida de aproximadamente 25 dB en la banda de 50 Hz, en el recinto emisor. La diferencia de niveles entre los promedios, medidos con una secuencia de explosiones de globos (Fig. 7.12) es relativamente baja. Sin embargo, este '*Método Impulsivo Globos*', que determina el promedio en una posición de micrófono a partir de una sola medida de una secuencia de impulsos, tiene la desventaja de que es imposible verificar la dispersión del conjunto de sucesos sonoros impulsivos, que se constituye a partir de cada explosión independiente.

Teniendo en cuenta el reducido volumen del recinto emisor de este caso de estudio en comparación a los demás – la zona común del Departamento de Física Aplicada es un recinto estrecho y con un volumen de $58,3 \text{ m}^3$ – y el nivel de potencia sonora que emite un disparo de la pistola de fogeo de calibre 9mm (aproximadamente 132 dB de nivel de potencia sonora global, según Deželak et al.^[3]), que se emplea en el '*Método Impulsivo 16283-1*', se cuestiona si las divergencias encontradas en este caso para el '*Método Impulsivo 16283-1*' pudieran deberse al hecho de que los puntos de recepción en la sala emisora se encontraran en el campo próximo de la fuente.

A partir de la alta divergencia de los resultados en el Departamento de Física Aplicada, se decide realizar una serie de ensayos complementarios con el objetivo de verificar cómo influyen los diferentes tipos de fuente de excitación, usados en este caso de estudio, en la medición de la atenuación por divergencia geométrica en campo reverberante. Este estudio se presenta en el apartado siguiente.

7.4 Atenuación por Divergencia Geométrica para Cada Tipo de Fuente

Este ensayo complementario, que se realiza en la zona común del Departamento de Física Aplicada, tiene por objetivo verificar la atenuación por divergencia geométrica para cada tipo de fuente usada en las mediciones de la diferencia de niveles D entre recintos. Para ello se comparan las excitaciones producidas por una fuente dodecaédrica emitiendo un ruido de banda ancha (ruido rosa), por una pistola de fogeo y por explosiones de globos.

El ensayo se realiza de la siguiente manera: se define un punto para situar la fuente F y tres puntos de medida 1, 2 y 3 tal y como se muestra en la Fig. 7.13. El punto 1 está a 1,60 m de distancia en relación a la fuente, el punto 2 a 3,20 m y el punto tres a 6,40 m, aproximadamente. Se toman cinco muestras en cada uno de los tres puntos.

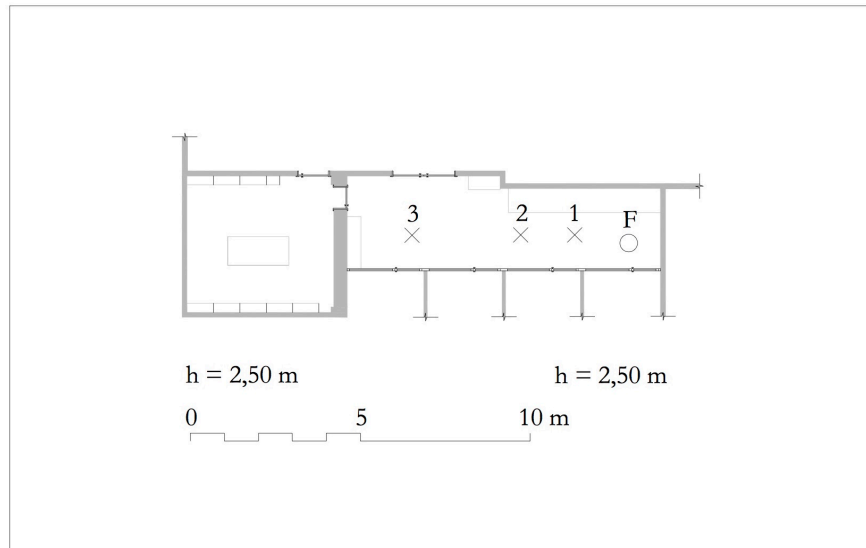


Fig. 7.13: Departamento de Física Aplicada. Punto de excitación F y de medición 1-3, para verificar la atenuación por divergencia geométrica del nivel de presión sonora en la zona común del Departamento, a partir de la excitación de diferentes tipos de fuente sonora.

Con esta serie de mediciones se busca determinar a partir de qué distancia se mide en campo difuso, independientemente de la estimación teórica de la frecuencia de corte, que delimita el comportamiento modal y difuso del campo acústico de la sala. Se pretende estudiar así mismo la influencia del campo próximo de la fuente en la zona común del Departamento de Física Aplicada. A continuación se presentan los resultados para una excitación con ruido rosa (Fig. 7.14), explosiones de globos (Fig. 7.15) y disparos de una pistola de fogueo de 9 mm (Fig. 7.16):

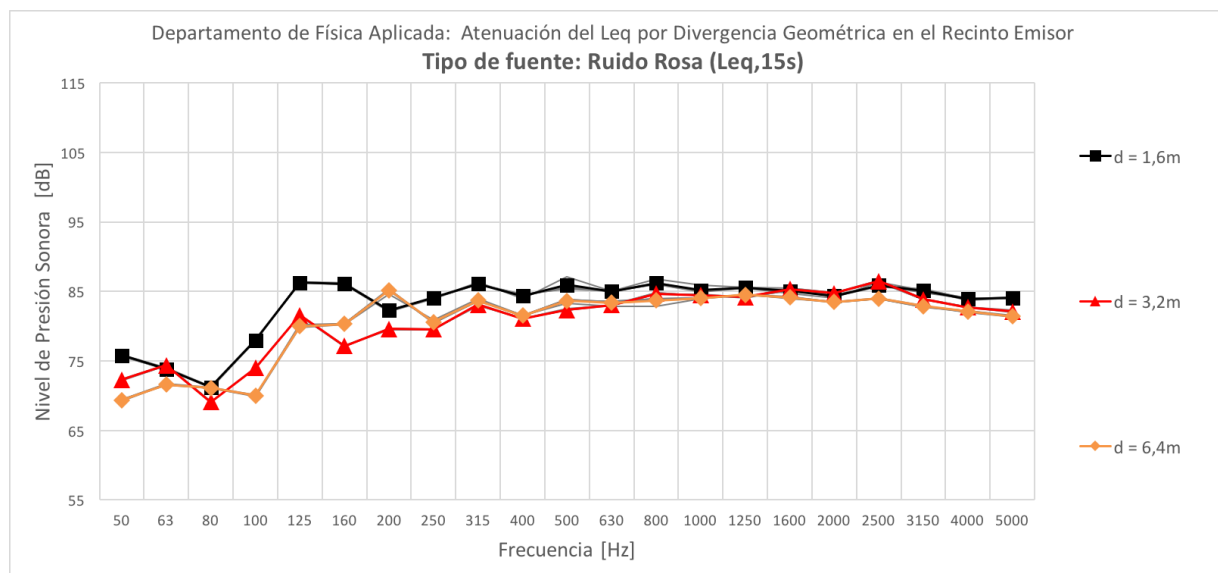


Fig. 7.14: Zona común del Departamento de Física Aplicada. Atenuación del nivel de presión sonora por divergencia geométrica, con la excitación de ruido rosa (promedio de cinco medidas por punto de medición).

Se excita acústicamente la sala con ruido rosa y se mide el Leq,T en un periodo de 15s cinco veces en cada punto. Los resultados se presentan en la Fig. 7.14. Las curvas que corresponden a las medidas en cada punto casi no se ven en la gráfica puesto que se sitúan por debajo de sus respectivas curvas de presión sonora promedio; por ello se verifica que la dispersión de las medidas en cada punto es despreciable. Los niveles medidos a 3,2 m y a 6,4 m de la fuente sugieren, en el rango de frecuencias desde 250 Hz a 1000 Hz, que el comportamiento del campo sonoro es difuso a estas distancias. En esta sala, la frecuencia de corte aproximada es de 200 Hz, lo cual concuerda adecuadamente con lo observado en el estudio experimental.

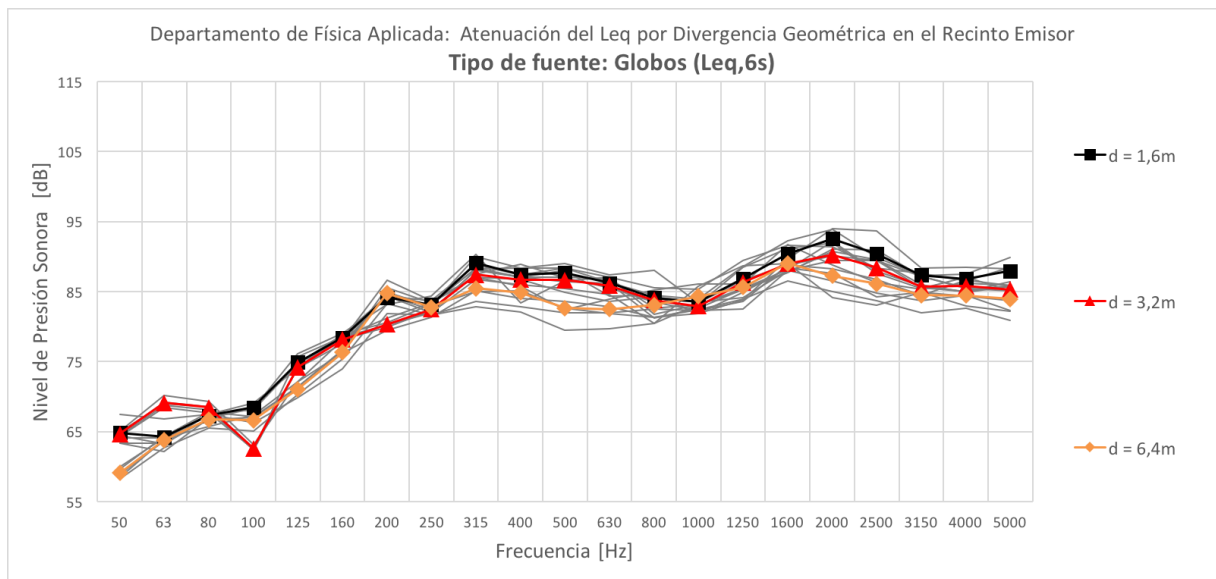


Fig. 7.15: Zona común del Departamento de Física Aplicada. Atenuación del nivel de presión sonora por divergencia geométrica, con la excitación de la explosión de globos (promedio de cinco medidas por punto de medición).

Al excitar acústicamente la sala con explosiones de globos, se miden cinco muestras del nivel de presión sonora con el parámetro Leq,T en un periodo de 6 s. Al empezar la medición, se explota un globo y se deja un lapso de silencio hasta que termine el registro. En la Fig. 7.15, se observa que la dispersión de las cinco medidas de explosiones de globo en cada punto tiene una tendencia a aumentar en las bandas de frecuencias más altas. No es posible determinar, a partir de estos resultados en bandas de frecuencia de tercio de octava, a qué distancia de la fuente el comportamiento del campo sonoro generado corresponde al campo difuso.

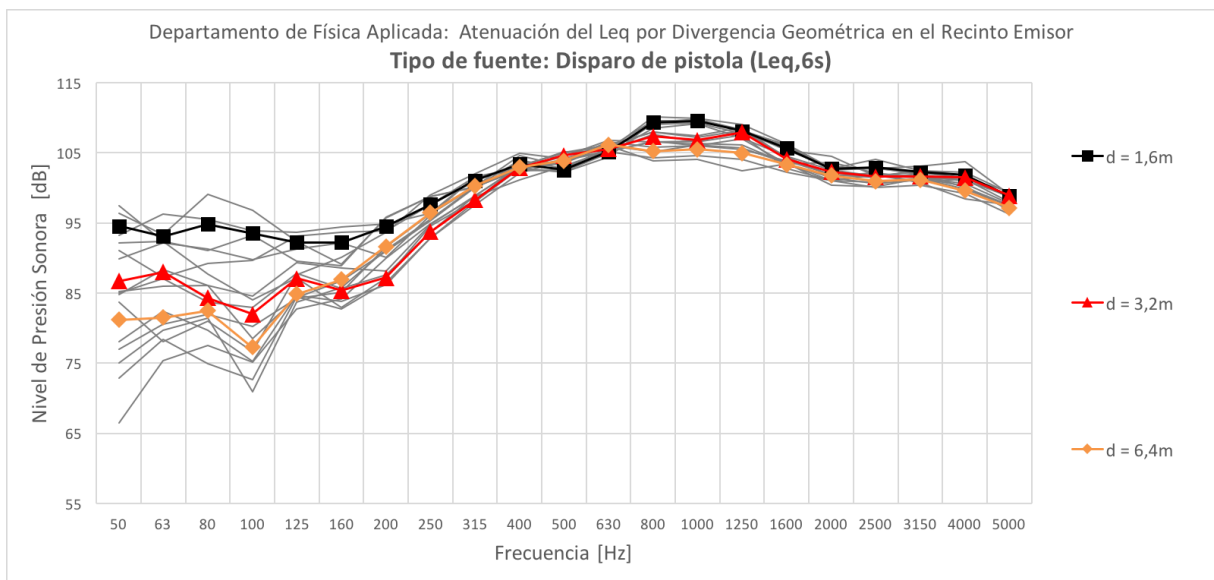


Fig. 7.16: Zona común del Departamento de Física Aplicada. Atenuación del nivel de presión sonora por divergencia geométrica, con la excitación del disparo de una pistola de fogeo (promedio de cinco medidas por punto de medición).

Al excitar acústicamente la sala con disparos de una pistola de calibre 9mm, se miden cinco muestras del nivel de presión sonora con el mismo parámetro y procedimiento utilizado en las medidas de la explosión de un globo. En la Fig. 7.16, se observa que la dispersión de las cinco medidas en cada punto tiene una tendencia a disminuir en las bandas de frecuencia más altas. Tampoco en este caso es posible determinar, a partir de estos resultados, a qué distancia de la fuente el comportamiento del campo sonoro generado es difuso. Si se compara con los resultados de la excitación con explosiones de globos, se identifica una dispersión elevada de las medidas por debajo de los 200 Hz. Por debajo de esta banda de frecuencia, también se identifica una diferencia de niveles de los promedios muy pronunciada al duplicar la distancia entre el punto 1 (1,6 m) y punto 2 (3,2 m), con una diferencia de niveles máxima aproximadamente igual a 17 dB, en la banda de 100 Hz.

Se observa así mismo que, tratándose de mediciones realizadas en campo reverberante, la capacidad de repetibilidad de la señal de la pistola está comprometida por debajo de la banda de 200 Hz, que es la frecuencia de corte aproximada de la sala. Los resultados de las mediciones con los tres tipos de fuente (figuras 7.14 a 7.16) señalan que en este recinto la atenuación del nivel de presión sonora por divergencia geométrica no siempre se cumple ya que, en algunas bandas de frecuencia, el nivel no necesariamente disminuye en función del aumento de la distancia a la fuente.

7.5 Desviación Típica de los Niveles Promedios para Cada Tipo de Señal de Excitación

Se ha calculado la desviación típica de las medidas realizadas para la determinación de los promedios de cada posición de fuente, en los ensayos del 'Método Clásico 16283-1', 'Método FT 50-5k 24s' y 'Método Impulsivo 16283-1' (variaciones de los métodos subrayados en el apartado 6.3.4).

A partir de estos valores de dispersión, se ha calculado un promedio de las desviaciones típicas para cada método de medición, de las medidas realizadas en el recinto emisor (Fig. 7.17) y receptor (Fig. 7.18) para los tres casos de estudio:

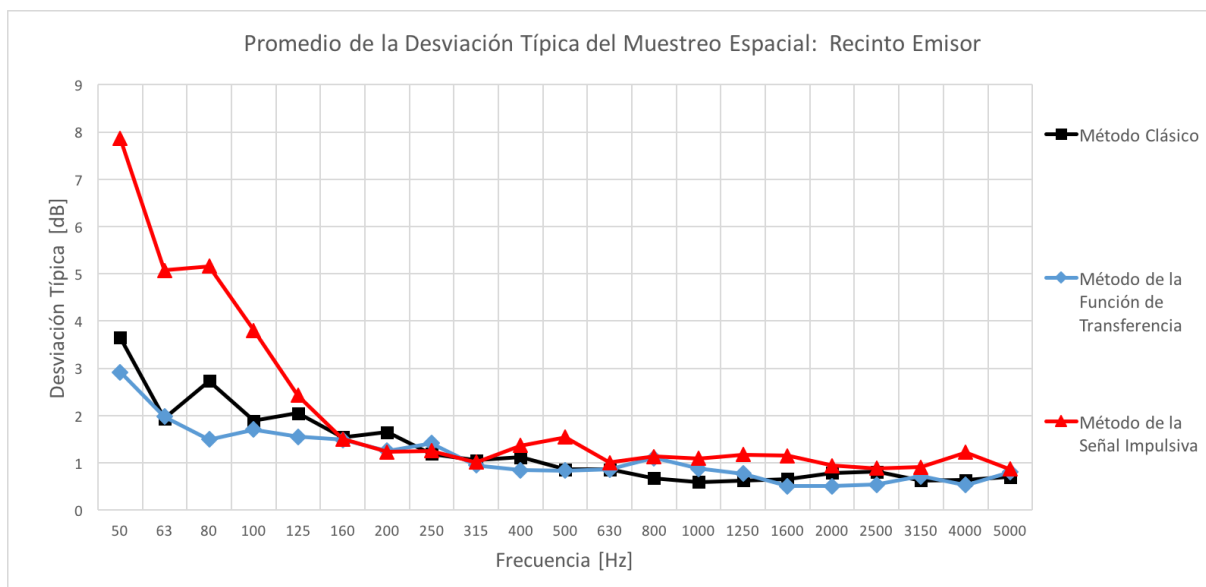


Fig. 7.17: Promedio de los valores de desviación típica del muestreo espacial en los recintos emisores de los casos de estudio, para cada método de medición.

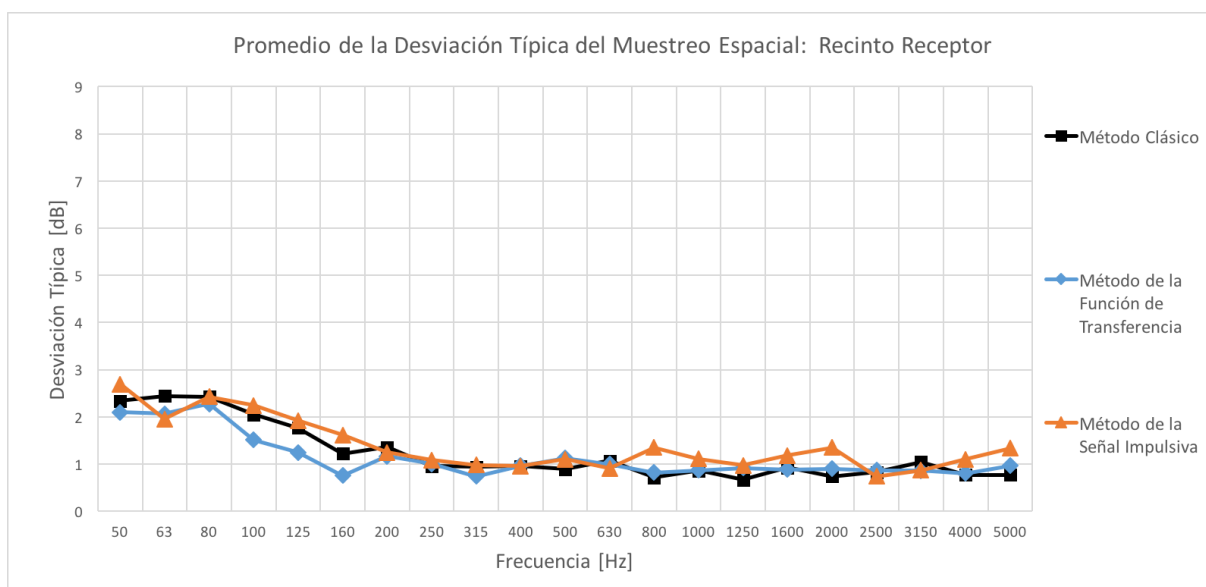


Fig. 7.18: Promedio de los valores de desviación típica del muestreo espacial en los recintos receptores de los casos de estudio, para cada método de medición.

En la Fig. 7.17 se evidencia un aumento de la desviación típica de las medidas realizadas por el método de la señal impulsiva en los recintos emisores de los casos de estudio, en las medias-bajas frecuencias. La Fig. 7.18 muestra que, en el recinto receptor, la desviación típica de las medidas es similar para los tres métodos. Dado que la señal impulsiva es la que presenta las desviaciones típicas más elevadas de entre los tres métodos estudiados en el recinto emisor, se

comparan en las figuras 7.19 y 7.20 las desviaciones típicas de este método para cada caso de estudio:

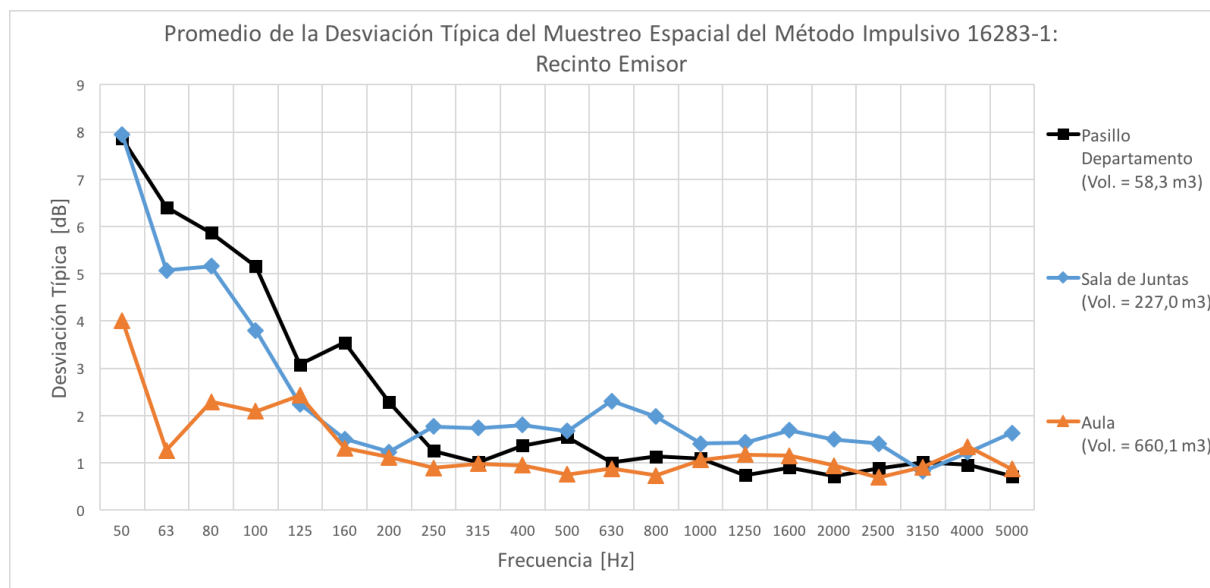


Fig. 7.19: Promedio de los valores de desviación típica del muestreo espacial, en los recintos emisores de los ensayos con el 'Método Impulsivo 16283-1': comparación entre casos de estudio.

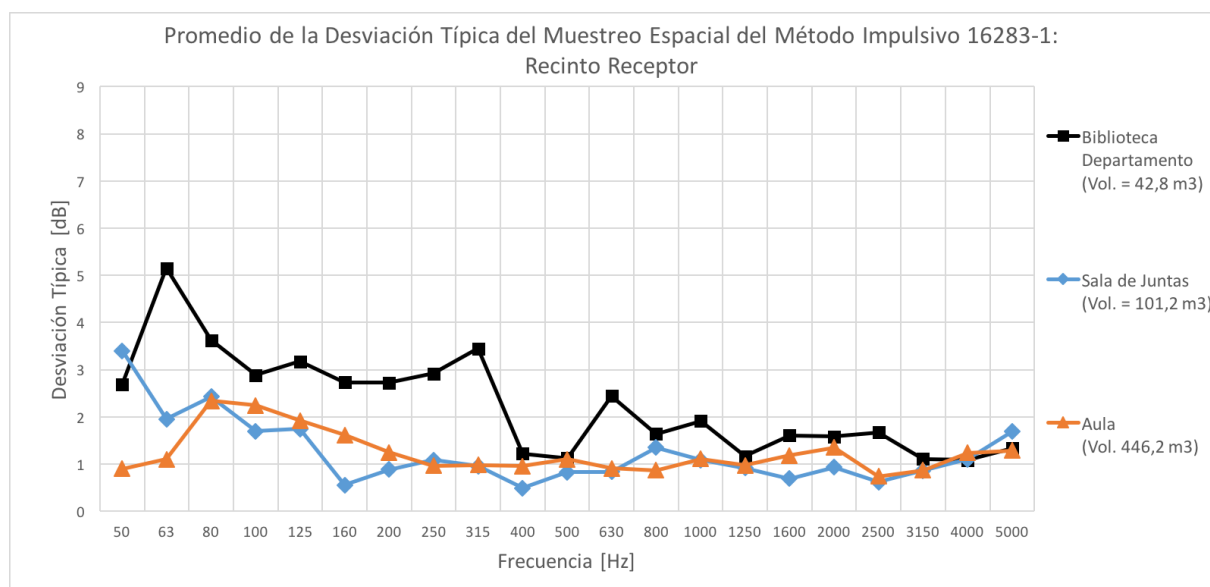


Fig. 7.20: Promedio de los valores de desviación típica del muestreo espacial, en los recintos receptores de los ensayos con el 'Método Impulsivo 16283-1': comparación entre casos de estudio.

En la Fig. 7.19 se observa la disminución de la desviación típica media, en las bandas de medias-bajas frecuencias, en función del incremento del volumen de los recintos emisores medidos. En los recintos receptores (Fig. 7.20), los valores medios de las desviaciones típicas en la sala de juntas (caso de estudio 1) y en el aula (caso de estudio 2) son semejantes en casi todo el espectro. Las mediciones en la biblioteca (caso de estudio 3) son las que presentan los valores

medios más altos de desviación, no solo a medias-bajas frecuencias sino también en el rango de altas frecuencias comprendido entre 630 Hz y 2500 Hz.

La Tabla 7.1 presenta una comparación de las distancias de los puntos de excitación y de medición, para los tres casos de estudio. Esta tabla se realiza con la intención de explicar las altas desviaciones típicas de las medidas realizadas en los recintos emisores con el “Método Impulsivo 16283-1”, que emplea una pistola de fogueo. Estas desviaciones son particularmente visibles en las medias-bajas frecuencias en el Departamento de Física Aplicada (figuras 7.10 y 7.11).

Tabla 7.1: Comparación de las distancias en el recinto emisor de cada caso de estudio.

Recinto Emisor Caso de Estudio	Distancia Micrófono - Fuente			Promedio de la Menor Distancia Mic - Pared	Volumen	Superficie	Frecuencia de Corte (fs)
	Min	Max	Promedio				
Sala de Juntas	2,1 m	8,1 m	4,7 m	2,0 m	227,0 m3	273,8 m2	100 Hz
Aula	3,5 m	9,5 m	6,5 m	2,3 m	660,1 m3	588,8 m2	63 Hz
Z. Común Depto.	0,8 m	3,8 m	2,4 m	0,9 m	58,3 m3	106,4 m2	200 Hz

Al comparar la gráfica de la Fig. 7.19 con las frecuencias de corte de la Tabla 7.1 se observa que, no sólo la desviación típica de las medidas a medias-bajas frecuencias aumenta a medida que disminuye el volumen de la sala, sino que también lo hace la pendiente de las curvas de dispersión en dirección a las bajas frecuencias. Este comportamiento es claro a partir de la banda más próxima a la frecuencia de corte de cada sala, que teóricamente delimita el rango de frecuencias del campo acústico donde predomina el comportamiento modal, cuya distribución de presiones es bastante irregular en ese rango, tal y como se expuso en los conceptos teóricos que se presentan en el capítulo 2 sobre la propagación del sonido en recintos cerrados.

En la zona común (recinto emisor) del Departamento, donde las medidas con el ‘Método Impulsivo 16283-1’ presentan las mayores desviaciones típicas de entre todos los casos de estudio, se debe señalar que el “promedio de las distancias micrófono-fuente” y el “promedio de la menor distancia entre cada posición de micrófono y un cerramiento de la sala” (Tabla 7.1) son menores que en los demás casos de estudio. Esta situación puede contribuir a la baja repetibilidad de las medidas, ya que los puntos de medición están simultáneamente más cerca de la fuente de excitación y de las superficies reflectantes que conforman las fronteras del recinto. Estas zonas son más susceptibles a tener altos niveles y grandes variaciones de la presión sonora en función del punto de medición, en el rango de frecuencias correspondiente al campo modal de la sala. Cabe aquí resaltar la gran área acristalada (de bajo índice de absorción sonora) de las superficies del recinto emisor del Departamento de Física Aplicada, que separan la zona común de los despachos y que se aprecian en la Fig. 7.13. También es importante resaltar que el nivel de potencia de excitación de una pistola de fogueo es excesivamente alto para un recinto con un volumen tan reducido, en un ensayo típico de aislamiento acústico *in situ*.

Se puede deducir, a partir del estudio realizado, que el campo acústico modal generado por la pistola, por debajo de la frecuencia de corte ($f_s \approx 200$ Hz) de la sala emisora del Departamento de Física Aplicada, se excita plenamente debido a los altos niveles de potencia a

bajas frecuencias de la fuente. Sin embargo, debido a las condiciones de frontera específicas de este caso de estudio, al volumen del recinto y a la propia repetibilidad de la fuente, se pueden verificar variaciones de presión sonora muy altas en función del punto de medición en la sala, principalmente cerca de las superficies y de la fuente de excitación.

Todos los factores que influyan en la repetibilidad de la medida de la presión sonora absoluta de un espacio reverberante excitado por un ruido transitorio se deben considerar a la hora de interpretar los resultados de las mediciones con el método de la señal impulsiva. Aunque se puede deducir los motivos que conllevan a un aumento de la dispersión de las medidas con este método y al error de las mediciones realizadas, este estudio experimental es insuficiente para validar conclusiones objetivas sobre la dispersión y los errores que se observan, ya sea por el limitado control de las condiciones de los casos de estudio disponibles para los ensayos, o por el insuficiente muestreo de mediciones de la diferencia de niveles D entre recintos.

7.6 Ecualización de la Señal de Ruido Aleatorio en el Método Clásico

En las figuras siguientes (figuras 7.21 a 7.26) se presentan los resultados de la ecualización del ruido aleatorio. Esta ecualización se realiza antes de una medición con el método clásico para obtención del *ruido rosa efectivo* tal y como se describe en el apartado 6.2.1. Cuando la señal estacionaria que emite la fuente se estabiliza en el recinto, se mide el nivel de presión acústica equivalente en un promedio de 15 s ($Leq,15s$), en tres ángulos diferentes (0° , 120° y 240°) y a 1 m de distancia de la fuente dodecaédrica. Se compara el *ruido rosa efectivo* ecualizado (EQ MyNoise) con el ruido rosa por defecto, generado por el software REW (PN REW). El resultado medido en la sala de juntas, que es el recinto emisor del caso de estudio 1, se presenta en la Fig. 7.21:

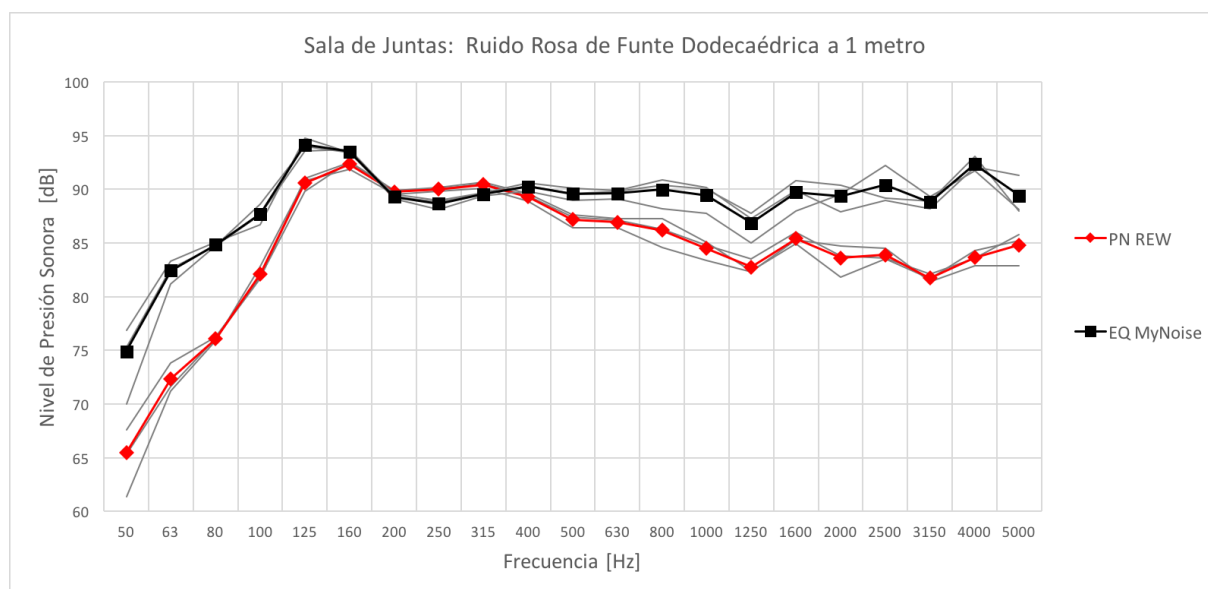


Fig. 7.21: Sala de juntas. Resultado de la ecualización de la señal aleatoria (EQ MyNoise), o ruido rosa efectivo, medido a un metro de la fuente en el recinto emisor. Parámetro de medición: $Leq,15s$.

En la Fig. 7.21 se observa un incremento de casi 10 dB en las bandas de tercios de octava a bajas frecuencias (50, 63 y 80 Hz), además de una mejora de la linealidad de respuesta en

frecuencia por encima de la banda de los 400 Hz. Dado que la norma ISO 16283-1^[18], en el apartado 7.2.1, exige una diferencia máxima de niveles de presión sonora equivalente de 8 dB entre bandas de frecuencia de tercios de octava adyacentes, al menos por encima de los 100 Hz, se verifica el cumplimiento del requisito en la Fig. 7.22, antes (Diferencia PN REW) y después (Diferencia EQ MyNoise) de la ecualización de la señal aleatoria:

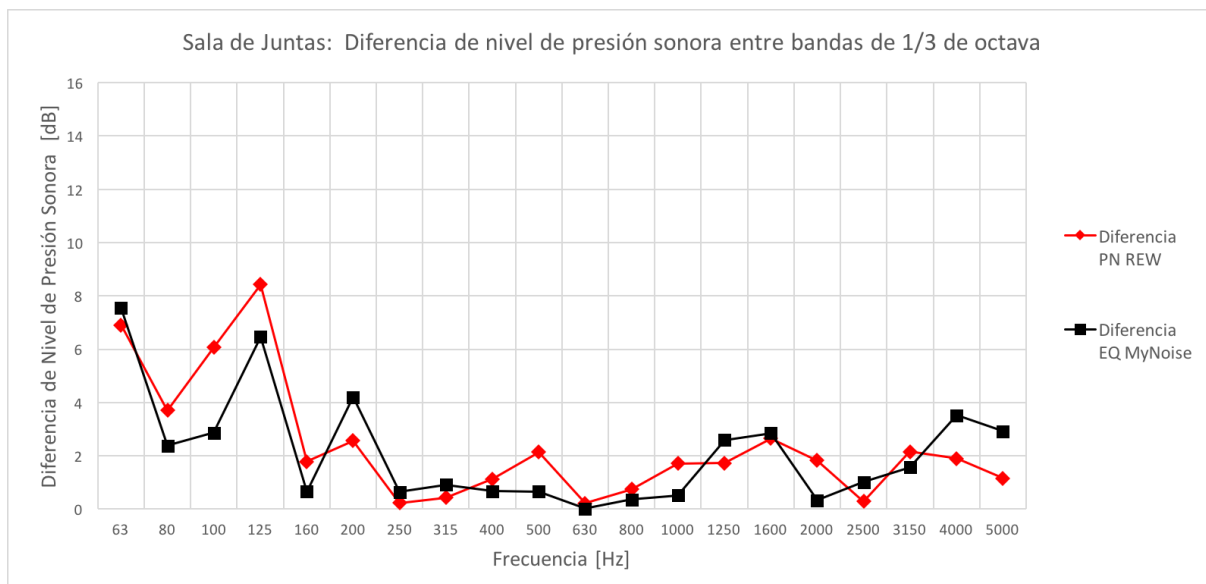


Fig. 7.22: Sala de juntas. Diferencia entre bandas de frecuencia, en relación a la frecuencia inferior, antes (Diferencia PN REW) y después (Diferencia EQ MyNoise) de la ecualización del ruido aleatorio. Parámetro de medición: $Leq,15s$.

En la Fig. 7.22 se observa que, en la sala de juntas, la ecualización de la señal aleatoria permite cumplir con el requisito de la ISO 16283-1, particularmente entre las bandas de 100 Hz y 125 Hz, aunque se verifique el aumento máximo del orden de +2 dB de la diferencia entre algunas bandas de tercios de octava adyacente en relación al ruido no ecualizado, siempre por debajo del nivel máximo permitido.

En la Fig. 7.23 se presenta el resultado de la ecualización de la señal aleatoria en el aula, que es el recinto emisor del caso de estudio 2. Se consigue, en este caso, un incremento máximo del nivel de excitación a bajas frecuencias de aproximadamente 5 dB (50 y 63 Hz), y una mejora de la linealidad de respuesta en frecuencia por encima de la banda de los 250 Hz:

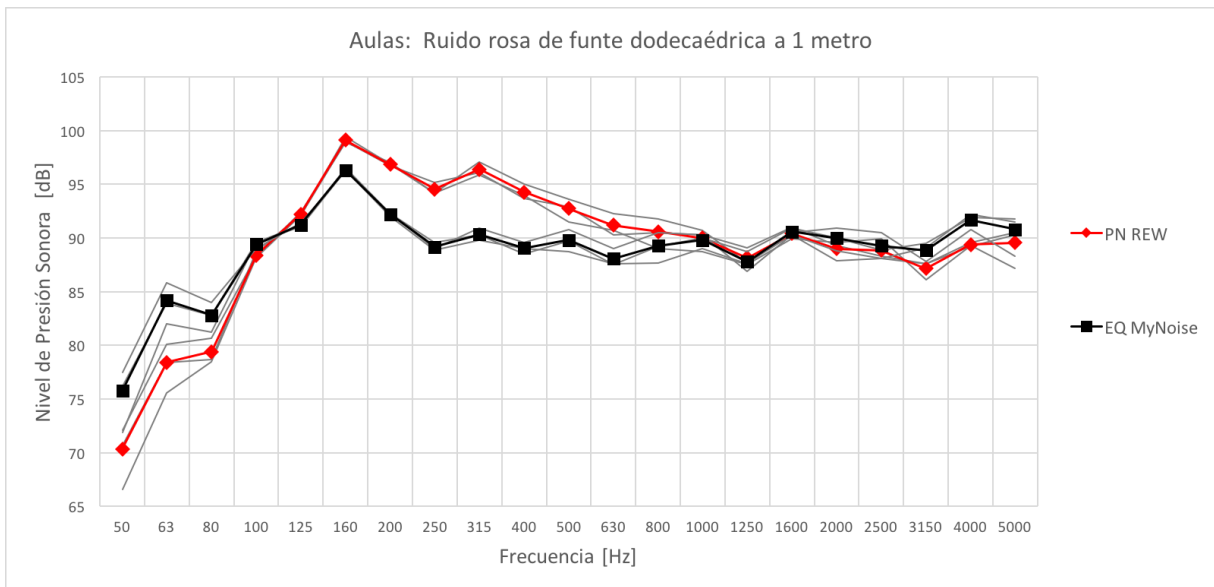


Fig. 7.23: Aulas. Resultado de la ecualización de la señal aleatoria (EQ MyNoise), o ruido rosa efectivo, medido a un metro de la fuente en el recinto emisor. Parámetro de medición: *Leq,15s*.

La exigencia de diferencia de niveles entre bandas adyacentes en el aula ya se cumplía antes de la ecualización de la señal, aunque después de la ecualización la diferencia entre algunas bandas de frecuencia se atenúa, como se puede observar en la Fig. 7.24:

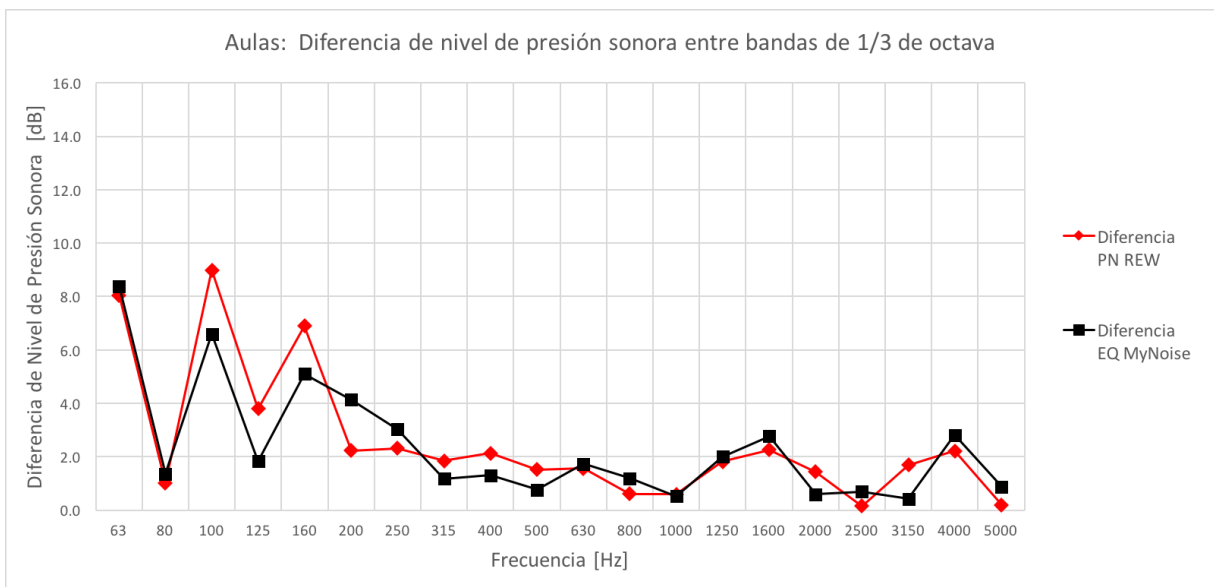


Fig. 7.24: Aulas. Diferencia entre bandas de frecuencia, en relación a la frecuencia inferior, antes (Diferencia PN REW) y después (Diferencia EQ MyNoise) de la ecualización del ruido aleatorio. Parámetro de medición: *Leq,15s*.

En la zona común del Departamento de Física Aplicada, se buscó con la ecualización incrementar los niveles de emisión sonora en las bajas y altas frecuencias, según la Fig. 7.25:

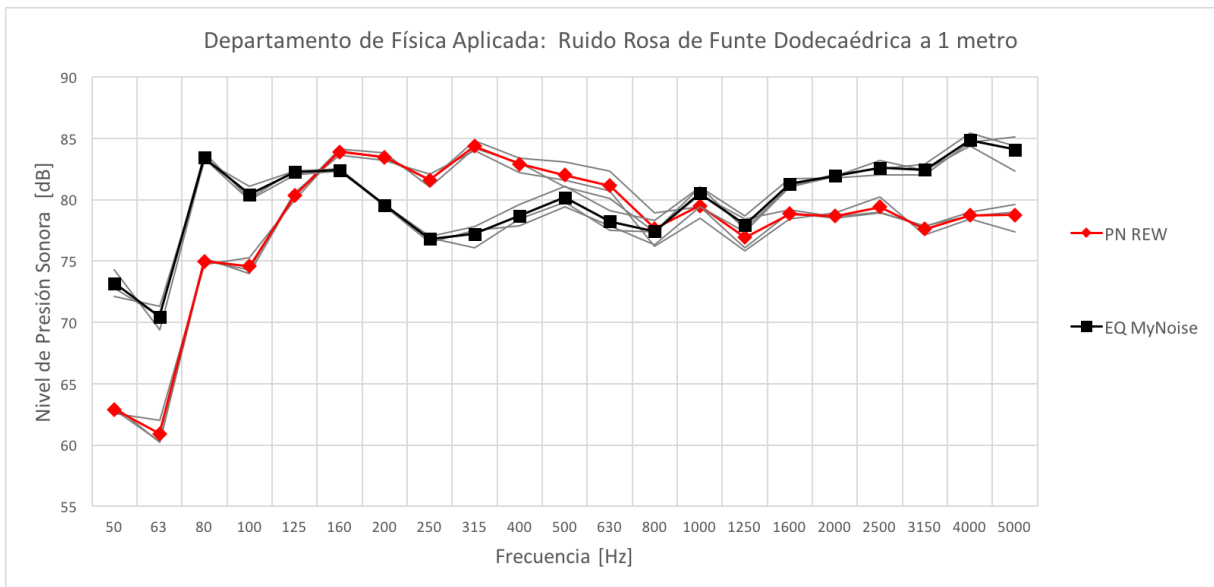


Fig. 7.25: Departamento de Física Aplicada. Resultado de la ecualización de la señal aleatoria (EQ MyNoise), o ruido rosa efectivo, medido a un metro de la fuente en el recinto emisor. Parámetro de medición: Leq,15s.

En el Departamento se consiguió, con la ecualización, aumentar el nivel de excitación en las bajas frecuencias hasta 10 dB (50 y 63 Hz), y en las altas frecuencias hasta 7 dB (4 kHz). De esta manera, la señal de excitación presenta una respuesta en frecuencia más plana.

En la Fig. 7.26 se observa que la señal de excitación, antes de la ecualización, ya cumplía con el requisito de la ISO 16283-1. En este caso, no se observa una significativa mejora de la ecualización al disminuir la diferencia de niveles entre bandas adyacentes, principalmente entre las bandas de 63 y 80 Hz.

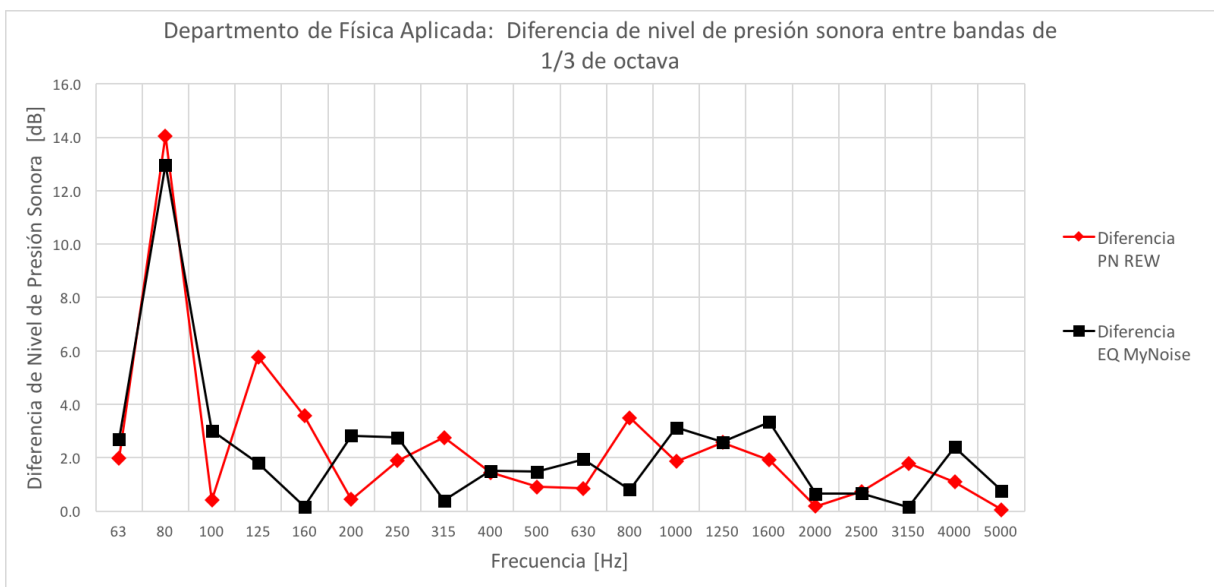


Fig. 7.26: Departamento de Física Aplicada. Diferencia entre bandas de frecuencia, en relación a la frecuencia inferior, antes (Diferencia PN REW) y después (Diferencia EQ MyNoise) de la ecualización del ruido aleatorio. Parámetro de medición: Leq,15s.

7.7 Periodo del Barrido Sinusoidal en el Método de la Función de Transferencia

De entre los métodos de medición estudiados y usados en la parte experimental de este trabajo, el que presentó resultados más homogéneos de todos los presentados en el apartado 6.3.4, fue el método de la función de transferencia con barrido sinusoidal exponencial.

En el caso de estudio 1 (Salas de juntas), la diferencia máxima que se aprecia en la Fig. 7.6 entre las medidas de diferencias de niveles D entre recintos con el 'Método FT 50-5k 24s' y el 'Método FT 50-200 24s' es de 1 dB, en la banda de 50 Hz. En el caso de estudio 2 (Aulas), la diferencia máxima que se verifica en los resultados de la Fig. 7.7, es de 0,8 dB, en la banda de 63 Hz. En estos dos casos de estudio, no se observa, por lo tanto, una diferencia significativa por el hecho de incrementar el tiempo del barrido en las bajas frecuencias.

En el caso de estudio 3 (Departamento de Física Aplicada), se comparan los resultados de la medición con un barrido por defecto de 24 s en todo el rango de frecuencias de interés ('Método FT 50-5k 24s'), con una medición con un barrido más rápido, de 12 s ('Método FT 50-5k 12s'). La diferencia máxima que se verifica en los resultados de la Fig. 7.10 entre métodos es de 1,4 dB en la banda de 80 Hz. Se puede concluir, en este caso de estudio, que el incremento del tiempo de barrido no influye de manera significativa en los resultados de las medidas de aislamiento entre recintos.

8. CONCLUSIONES

A partir del estudio experimental llevado a cabo en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid, en tres casos de estudio diferentes, se demuestra que los tres métodos de medición implementados en los casos de estudio 1 y 2 – salas de juntas y aulas, respectivamente – tienen una coherencia satisfactoria por encima de la banda de 80 Hz (figuras 7.6 y 7.7) con una diferencia máxima entre métodos de 4 dB en el caso de estudio 1, y de aproximadamente 3 dB en alguna banda frecuencia en el caso de estudio 2.

En el caso de estudio 3, realizado en el Departamento de Física Aplicada – donde los volúmenes de los recintos son relativamente pequeños comparados con los de los ensayos anteriores, y se aproximan más a la escala de un recinto de una vivienda típica – se puede verificar que no existe una diferencia significativa en los resultados del método de la función de transferencia de barrido sinusoidal de 12 s (*Método FT 50-5k 12s*), con los de barrido más largo, de 24 s. En este caso de estudio, a diferencia de en los demás, se observa que el resultado menos coherente del método de la señal impulsiva, es aquel que realiza un muestreo espacial según la ISO 16283-1 (*Método Impulsivo 16283-1*).

Debido al limitado número de ensayos realizados, no se puede concluir que el método de muestreo espacial, ya sea el propuesto por Deželak et al. o el muestreo normalizado por la ISO 16283-1, sea el factor que justifica la mayor o menor coherencia de las medidas del método de la señal impulsiva, por debajo de la frecuencia de corte del recinto emisor. Otros factores como la repetibilidad de la señal del disparo pueden también contribuir al error de las medidas, tal y como se ha podido observar en el ensayo complementario realizado en la zona común del Departamento (Fig. 7.16). Este estudio evidencia la baja repetibilidad de la medición de un disparo de pistola en campo reverberante, que en este caso, apunta hacia la necesidad de profundizar la investigación sobre su adecuación en ensayos de acústica, especialmente de aislamiento a ruido aéreo en recintos de volumen reducido.

Se deben considerar diferentes factores que pueden influenciar las mediciones de un suceso sonoro impulsivo en campo reverberante, ya sea con explosiones de globos o con disparos de pistola:

- La capacidad de la fuente de excitar los modos propios de la sala, en la cual influye la potencia de emisión de la fuente a estas frecuencias, su posición en el recinto, las características espectrales de esta excitación sonora y la directividad de la fuente a estas frecuencias.
- Los errores de repetibilidad de la señal, inherente al mecanismo de generación de la explosión/disparo de la fuente.
- La aleatoriedad de la propagación del sonido transitorio en campo difuso, relacionada principalmente con las medias-altas frecuencias de la señal de excitación.

Al comparar los resultados del método clásico con los de la función de transferencia se observa una alta coherencia en los tres estudios, si bien se pueden encontrar algunas diferencias entre resultados a bajas frecuencias (50, 63 y 80 Hz) en los casos de estudio 1 y 3. Los recintos de estos casos de estudio poseen volúmenes relativamente menores a los del caso de estudio en las aulas. Entre el método clásico y el de la señal impulsiva con una pistola de fogeo se observa, en los casos de estudio 1 y 2 (salas de juntas y aulas) buena coherencia de las medidas por encima de la frecuencia de corte aproximada del recinto emisor. Cerca y por debajo de la frecuencia de corte, se observa una baja repetibilidad de las medidas, en especial en el caso de estudio 3 (departamento). Las mediciones realizadas con globos y pistola en el Departamento de Física Aplicada presentan significativas diferencias en todo el rango de frecuencias de interés (Fig. 7.10).

A partir de las medidas con el método de la función de transferencia, se concluye, en el caso de estudio 3, que los resultados obtenidos con un tiempo de barrido de 12 segundos no presentan una diferencia significativa comparándolos al barrido con un periodo dos veces más largo. De hecho, en todos los casos de estudio, las variaciones del método de la función de transferencia no presentan diferencias significativas, ya sea al aumentar el tiempo de medición en las bajas frecuencias o en todo el rango de frecuencias de interés. Sin embargo, se debe tener en cuenta la norma ISO 18233, que recomienda una prolongación del tiempo de barrido según las condiciones de ensayo: volumen de los recintos, nivel de ruido de fondo en el recinto emisor, etc.

En los ensayos realizados por el método clásico, se ha comprobado una mejora de la señal de excitación como resultado de la ecualización de la señal generada, de acuerdo con el método propuesto para obtención de un ruido rosa efectivo (apartado 6.3.1). El procedimiento de ecualización del ruido aleatorio *in situ* ha posibilitado aumentar la respuesta de la fuente a bajas frecuencias y conseguir un espectro más lineal, cumpliendo así el requisito de la ISO 16283-1.

En cuanto al tiempo de ensayo de cada uno de los métodos, si se considera tan sólo el tiempo de obtención de las medidas, los nuevos métodos ofrecen la ventaja de realizar la medición con más rapidez. Esta rapidez es especialmente destacable en el método de la señal impulsiva, que tarda aproximadamente un tercio del tiempo necesario para realizar un ensayo según el método clásico. Además, dependiendo del tipo de muestreo espacial en el recinto receptor y de la instrumentación empleada, las mediciones que se realizan con los nuevos métodos se pueden utilizar para determinar el tiempo de reverberación de acuerdo con el método de Schroeder y la ISO 3382-2, disminuyendo aún más el tiempo total del ensayo. En cualquier caso, se ha de tener en cuenta la facilidad de montaje y preparación para el método de la señal impulsiva. Esta facilidad se debe a que su cadena de medida se reduce a una fuente de ruido autosuficiente y a un sonómetro analizador.

8.1 Futuras Líneas de Investigación

Tras el estudio efectuado, surgen nuevas ideas para investigar y eventualmente realizar una propuesta de un método alternativo para la medida de aislamiento acústico completamente fundamentada y validada. A título de ejemplo se enumeran algunas de las posibles líneas de trabajo:

1. Dado que el estudio experimental muestra una baja repetibilidad de los disparos de pistola por debajo de la frecuencia de corte en situación de campo acústico reverberante (caso de estudio 3), se propone la realización de más ensayos que verifiquen la distribución de presiones de campo acústico modal en el espacio (malla de puntos de medición) en función del tiempo, a partir de disparos de una pistola de fogeo y de otros tipos de fuente de ruido impulsivo, con diferentes niveles de potencia sonora y en recintos con volúmenes distintos.
2. Sería interesante verificar empíricamente cómo las características de la señal de la fuente en el método de la señal impulsiva influyen en la calidad de las medidas de aislamiento, en comparación con el método cuya señal de excitación es un ruido estacionario. Se propone revisar el método de la señal impulsiva, en relación al procedimiento de excitación y medición del muestreo espacial en el recinto emisor, y también la influencia del error que se produce por el mecanismo de generación de la señal y del nivel de potencia de la fuente, principalmente en la formación del campo acústico modal de la sala. Tales estudios son importantes para ensayos en recintos de pequeño volumen, que corresponden a la escala de un recinto de viviendas.
3. Otra mejora que se podría estudiar es el desarrollo de un sistema electroacústico acoplado a un altavoz dodecaédrico normalizado, que comunicado a un sonómetro analizador, automatice el proceso de ecualización de la señal de ruido aleatorio *in situ*, para obtener un ruido rosa efectivo en el recinto emisor. También se podría investigar cómo influye la posición del sonómetro y de la fuente al ecualizar las bajas frecuencias en un recinto pequeño, debido a la influencia de los modos propios de la sala.
4. Dado que el nivel de potencia acústico generado por un disparo de pistola de fogeo es elevado – según se ha visto en el apartado 5.1.1 – se podrían investigar mecanismos de ajuste de este tipo de fuente, en los casos en que se realicen mediciones en salas de pequeño volumen y recintos de viviendas en general.
5. Este trabajo se ha limitado a la implementación de los métodos de medición de aislamiento descritos y a comparar los resultados de la diferencia de niveles D entre recintos, sin una evaluación cualitativa de las medidas. En este sentido, se propone una futura investigación sobre el cálculo de la incertidumbre asociada a la medida con los procedimientos de medición alternativos presentados en este trabajo, basada en los criterios establecidos por la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM).

ANEXO A: NIVELES PROMEDIOS POR MÉTODO DE MEDICIÓN

Los niveles de presión sonora promedio de los resultados de las mediciones en las gráficas comparativas del capítulo 7 (figuras 7.1, 7.6, 7.7 y 7.10) sobre los resultados y discusión del estudio experimental, y que no se presentan en esta memoria, se ordenan según el caso de estudio en los apartados que siguen.

A.1 Ensayos en las Salas de Juntas

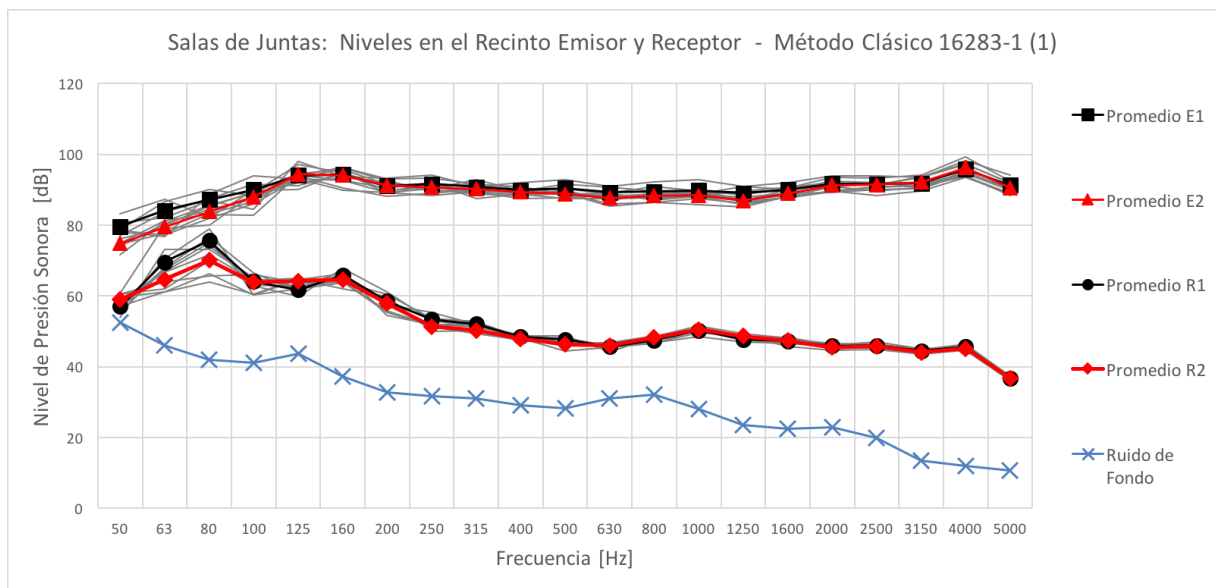


Fig. A.1: Salas de juntas. Método Clásico 16283-1 (1): Promedios en el recinto emisor y receptor.

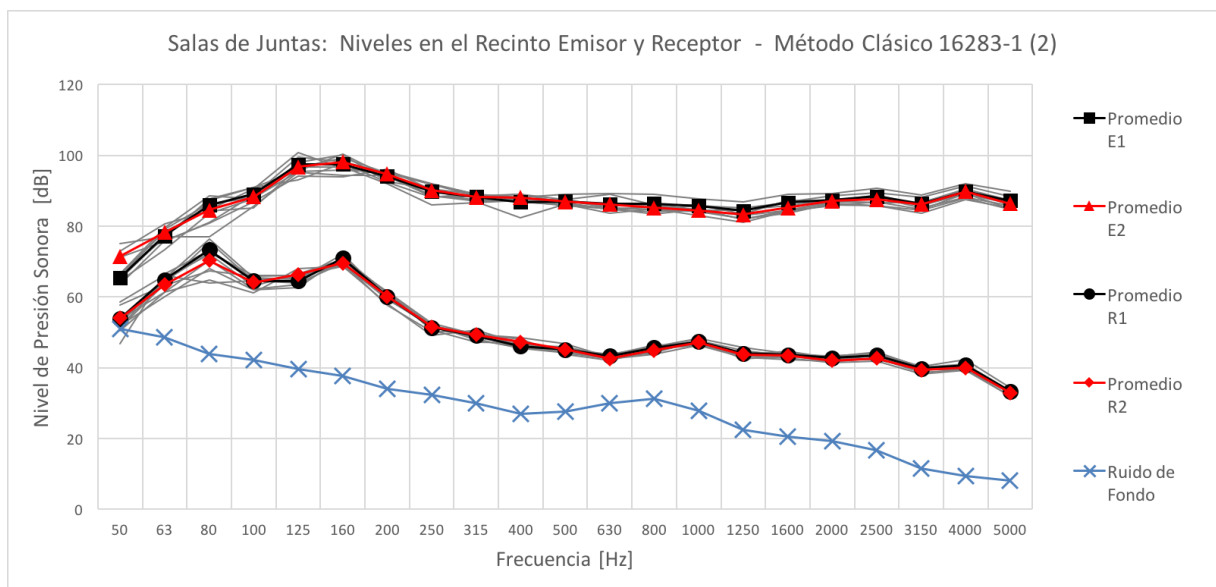


Fig. A.2: Salas de juntas. Método Clásico 16283-1 (2): Promedios en el recinto emisor y receptor.

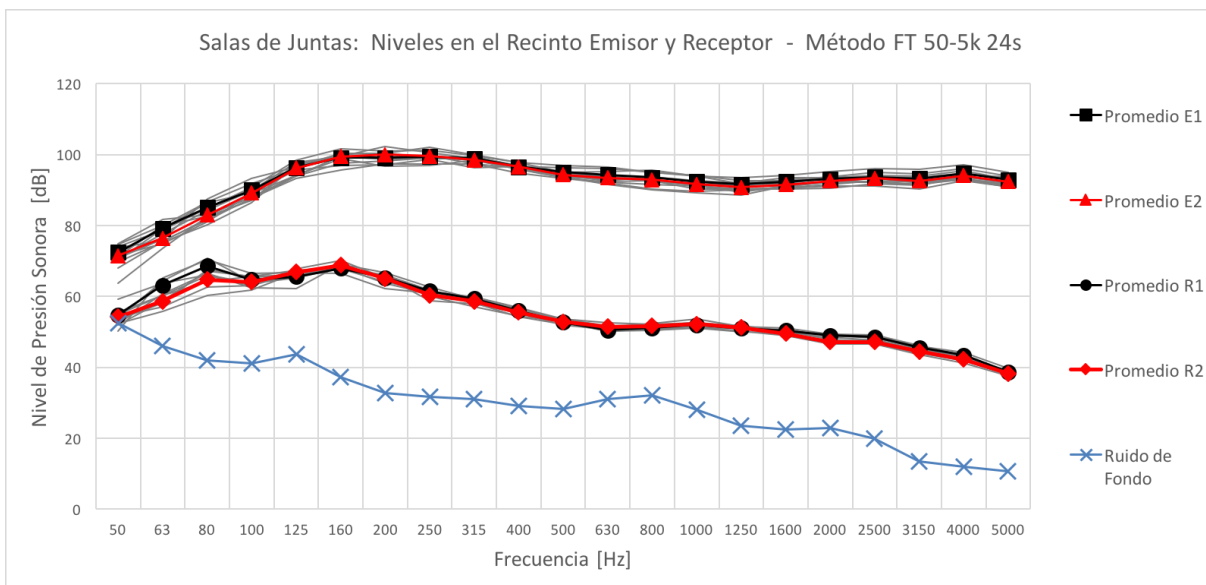


Fig. A.3: Salas de juntas. Método FT 50-5k 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.

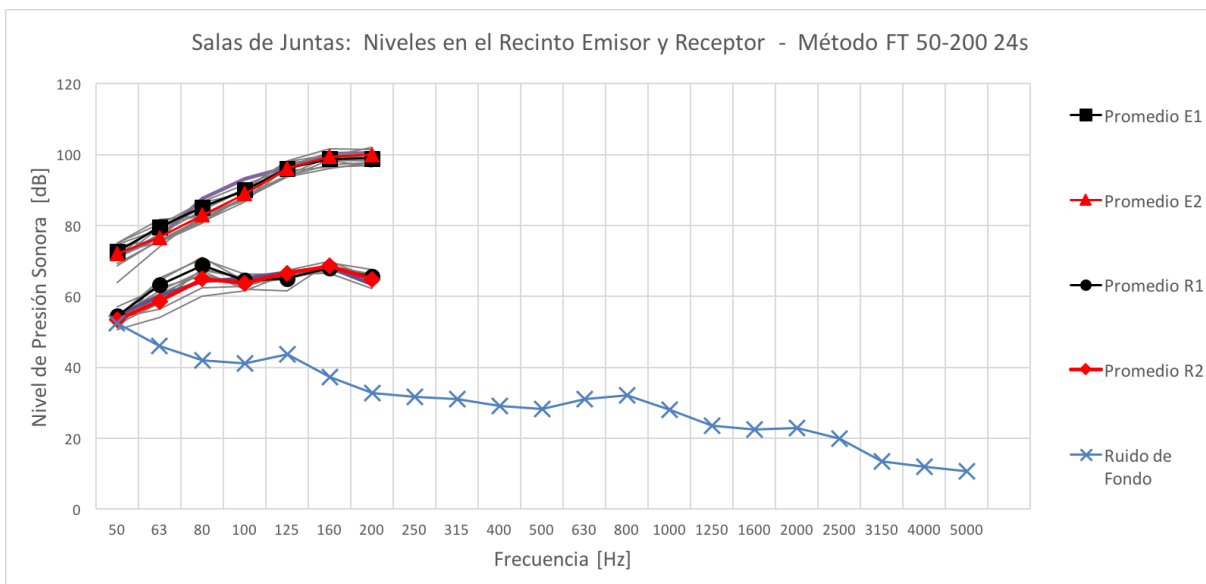


Fig. A.4: Salas de juntas. Método FT 50-200 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.

A.2 Ensayos en las Aulas

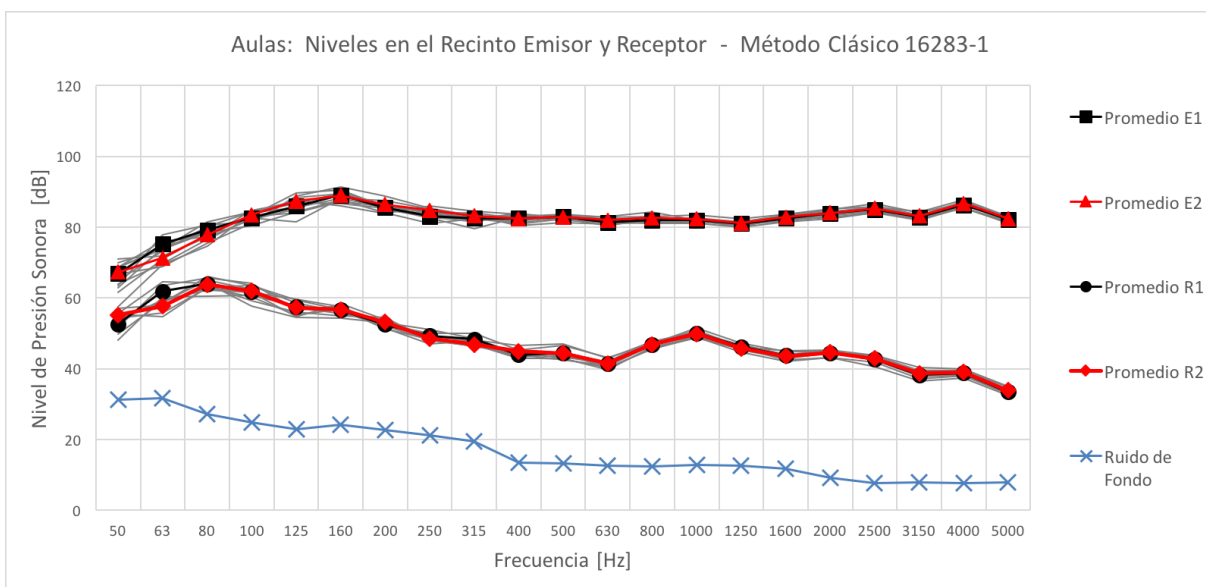


Fig. A.5: Aulas. Método Clásico 16283-1: Promedios en el recinto emisor y receptor.

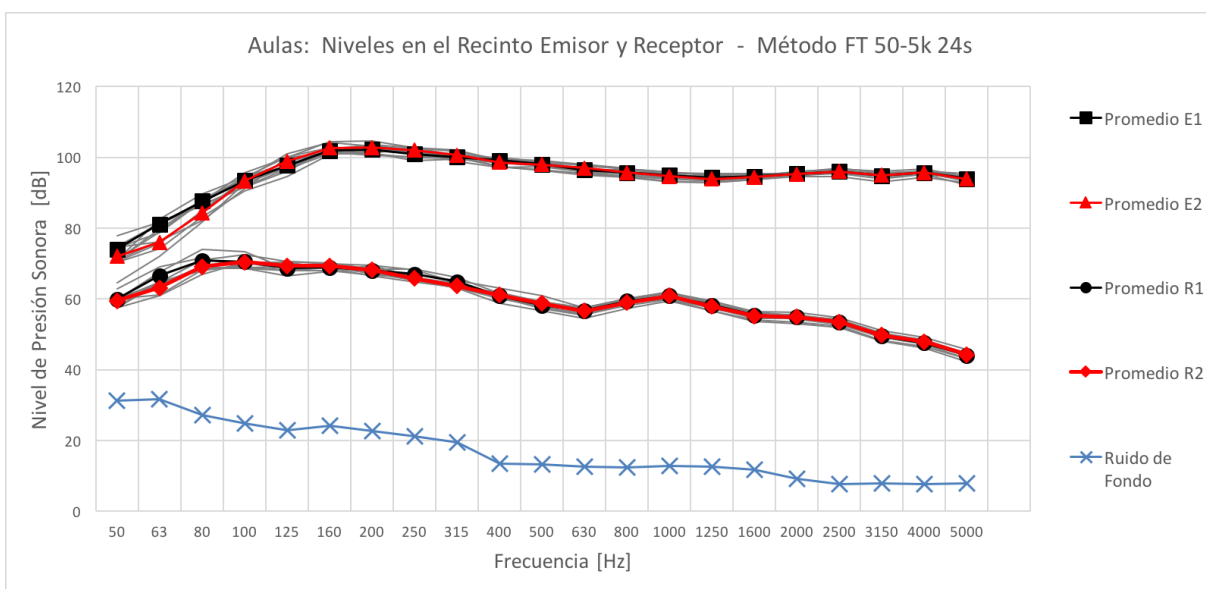


Fig. A.6: Aulas. Método FT 50-5k 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.

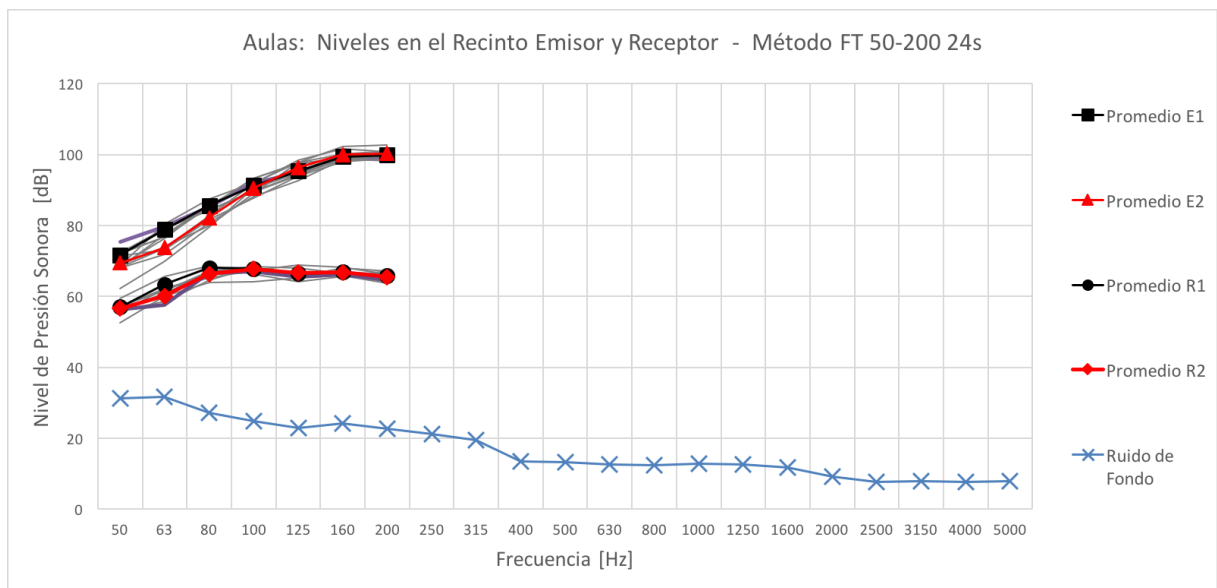


Fig. A.7: Aulas. Método FT 50-200 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.

A.3 Ensayos en el Departamento de Física Aplicada

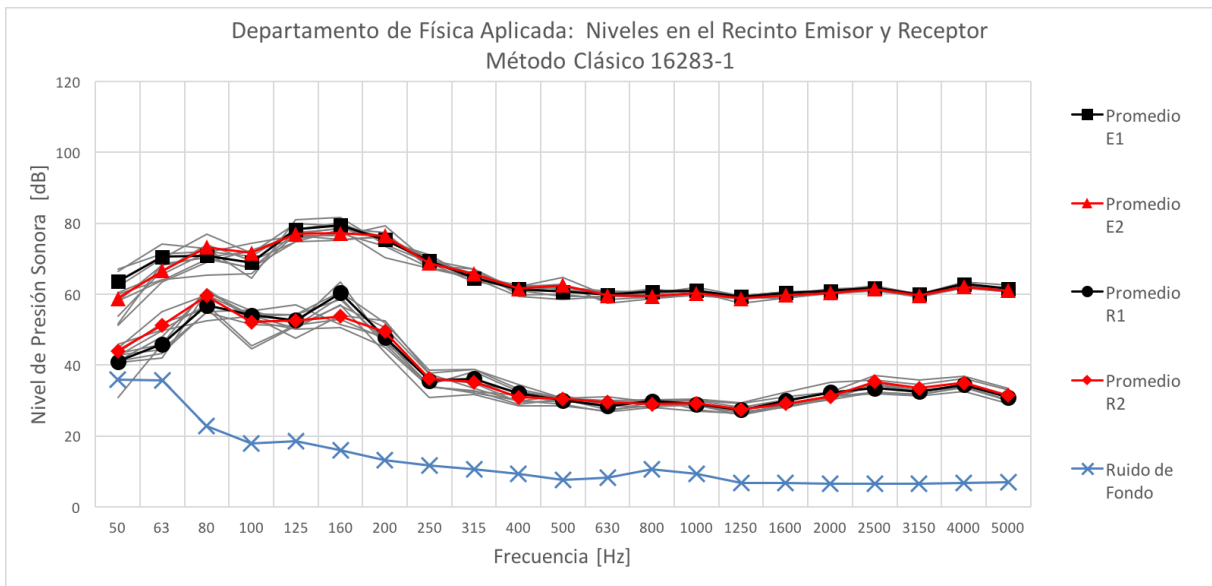


Fig. A.8: Departamento de Física Aplicada. Método Clásico 16283-1: Promedios en el recinto emisor y receptor.

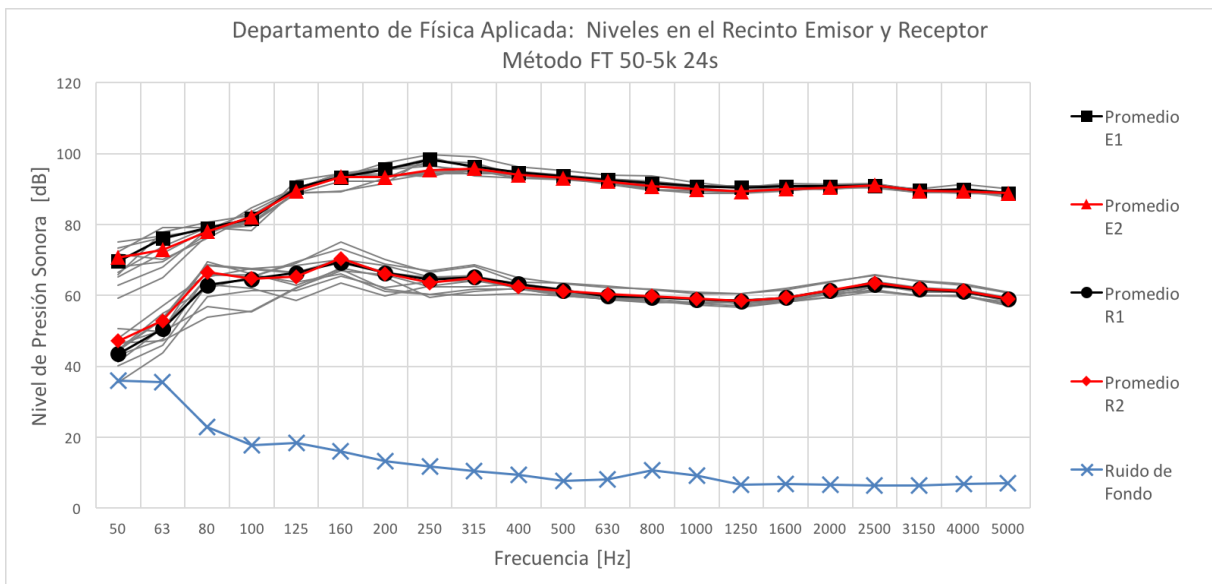


Fig. A.9: Departamento de Física Aplicada. Método FT 50-5k 24s: Promedios en el recinto emisor y receptor.

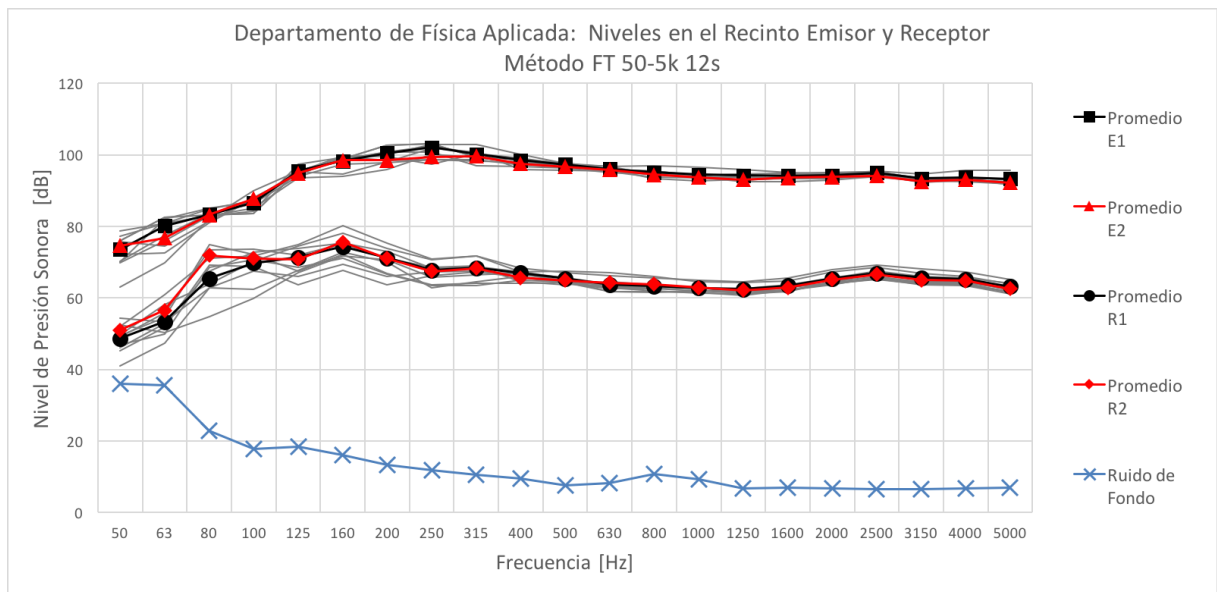


Fig. A.10: Departamento de Física Aplicada. Método FT 50-5k 12s: Promedios en el recinto emisor y receptor.

ANEXO B: IMÁGENES DE LOS ENSAYOS

Se presentan a continuación imágenes representativas de algunos ensayos realizados en el estudio experimental, así como su respectiva cadena de medida, según el caso de estudio.

B.1 Imágenes de la Salas de Juntas

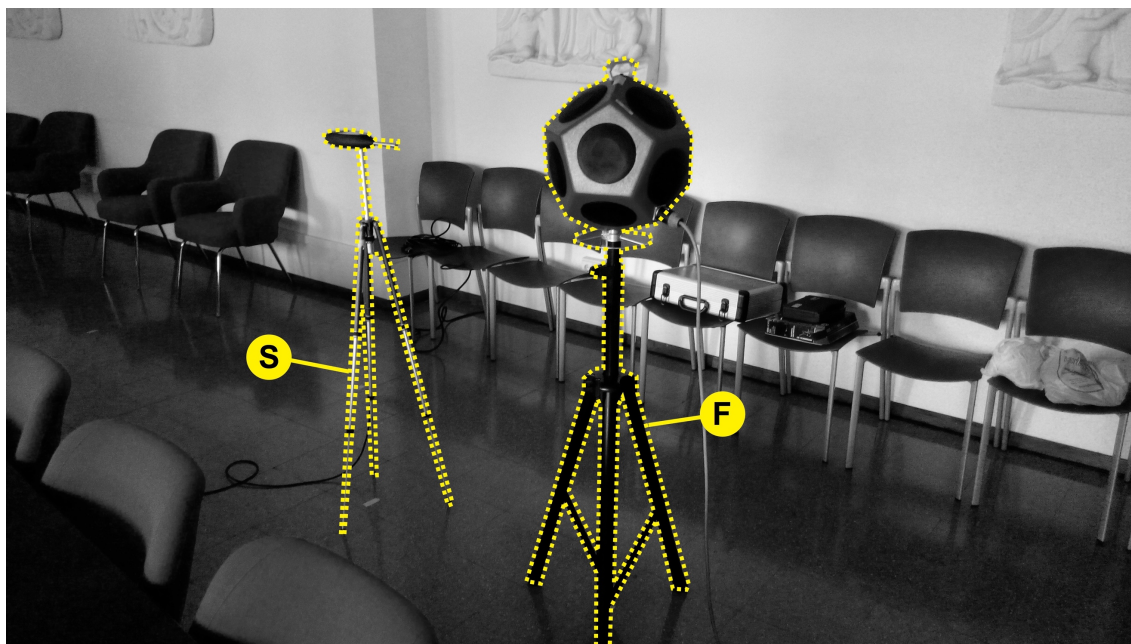


Fig. B.1: Ensayo en la sala de juntas, recinto emisor. Verificación del resultado de la ecualización de la señal aleatoria generada por la fuente. **S:** sonómetro analizador. **F:** fuente dodecaédrica.

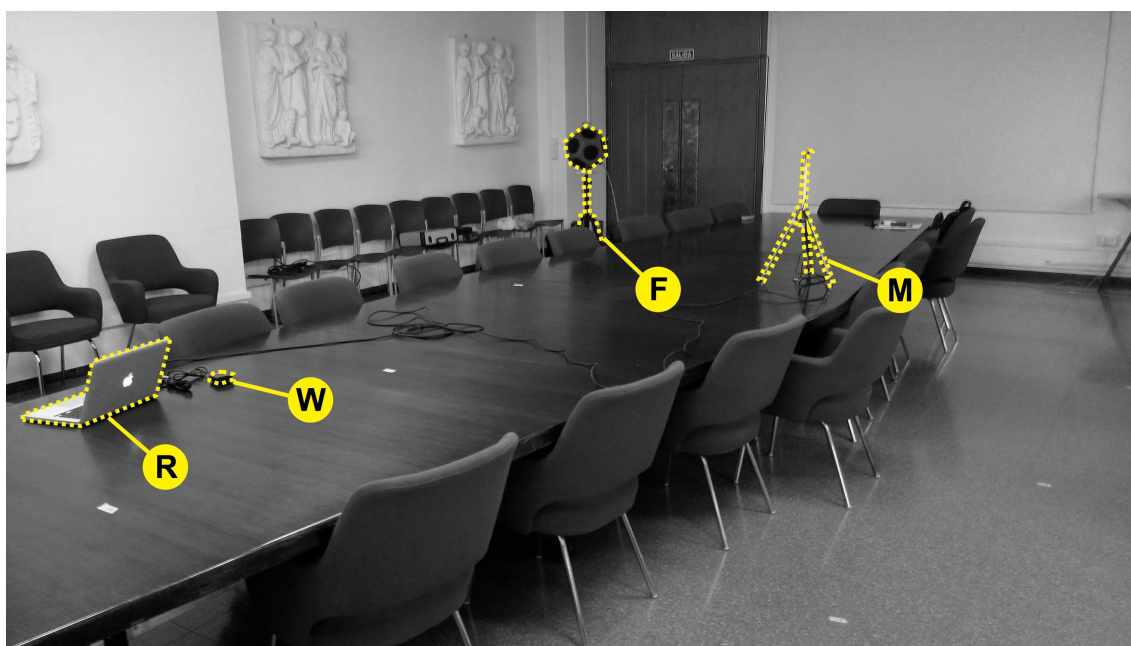


Fig. B.2: Ensayo en la sala de juntas, recinto emisor. Método de la función de transferencia. **R:** portátil con el software REW. **W:** emisor UHF. **F:** fuente dodecaédrica. **M:** micrófono de condensador.

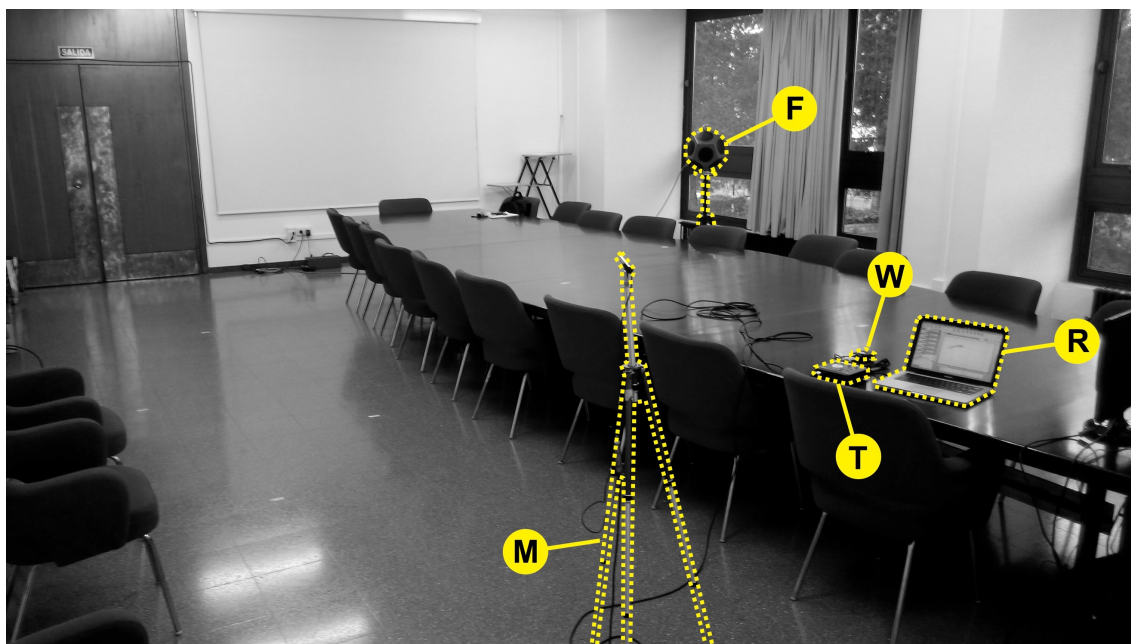


Fig. B.3: Ensayo en la sala de juntas, recinto emisor. Método de la función de transferencia. **M:** micrófono de condensador. **F:** fuente dodecaédrica. **T:** interfaz de audio. **W:** emisor UHF. **R:** portátil con el software REW.

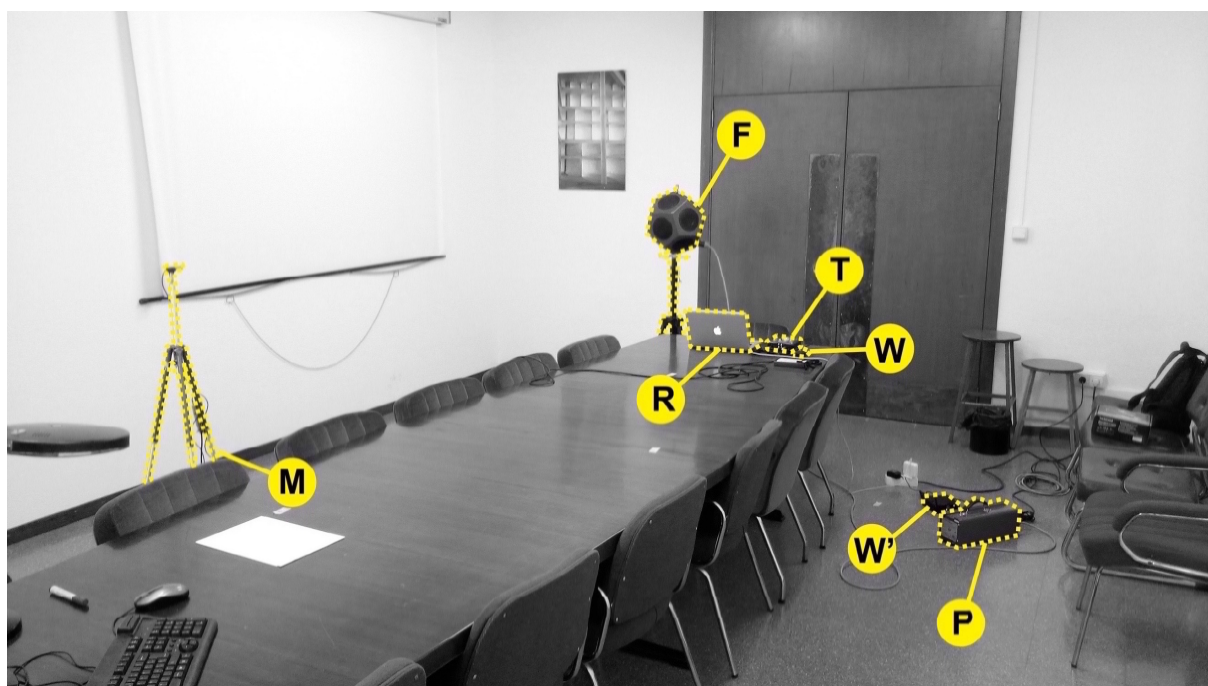


Fig. B.4: Ensayo en la sala de juntas, medición del TR en el recinto receptor. Método de la función de transferencia. **M:** micrófono de condensador. **R:** portátil con el software REW. **F:** fuente dodecaédrica. **T:** interfaz de audio. **W:** emisor UHF. **W':** receptor UHF. **P:** amplificador digital.

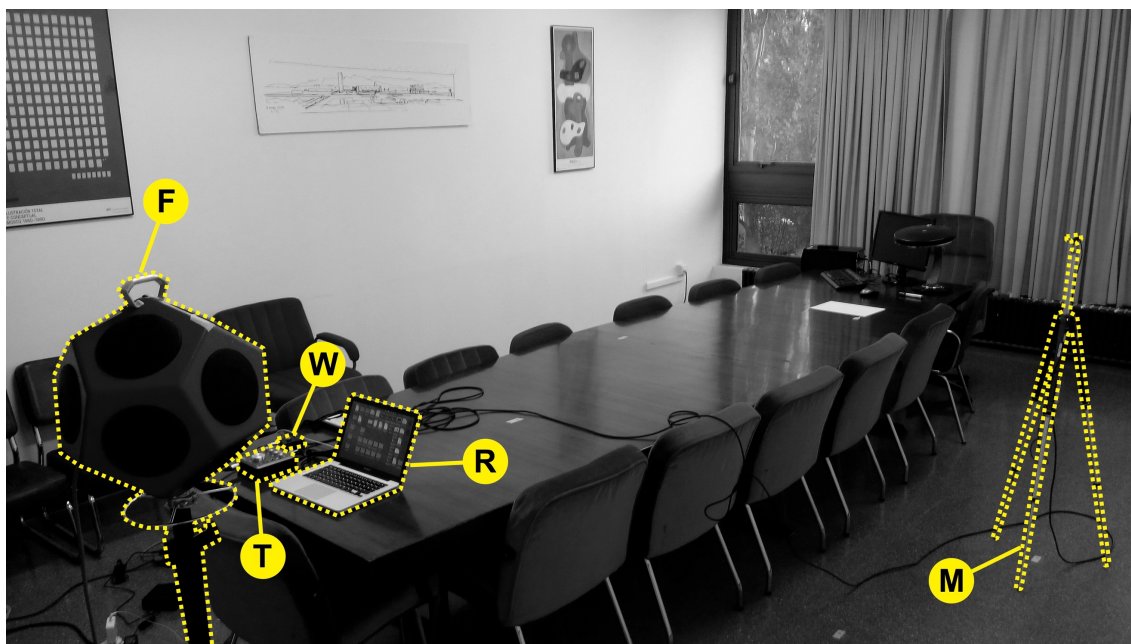


Fig. B.5: Ensayo en la sala de juntas, medición del TR en el recinto receptor. Método de la función de transferencia. **F:** fuente dodecaédrica. **T:** interfaz de audio. **W:** emisor UHF. **R:** portátil con el software REW. **M:** micrófono de condensador.

B.2 Imágenes de las Aulas

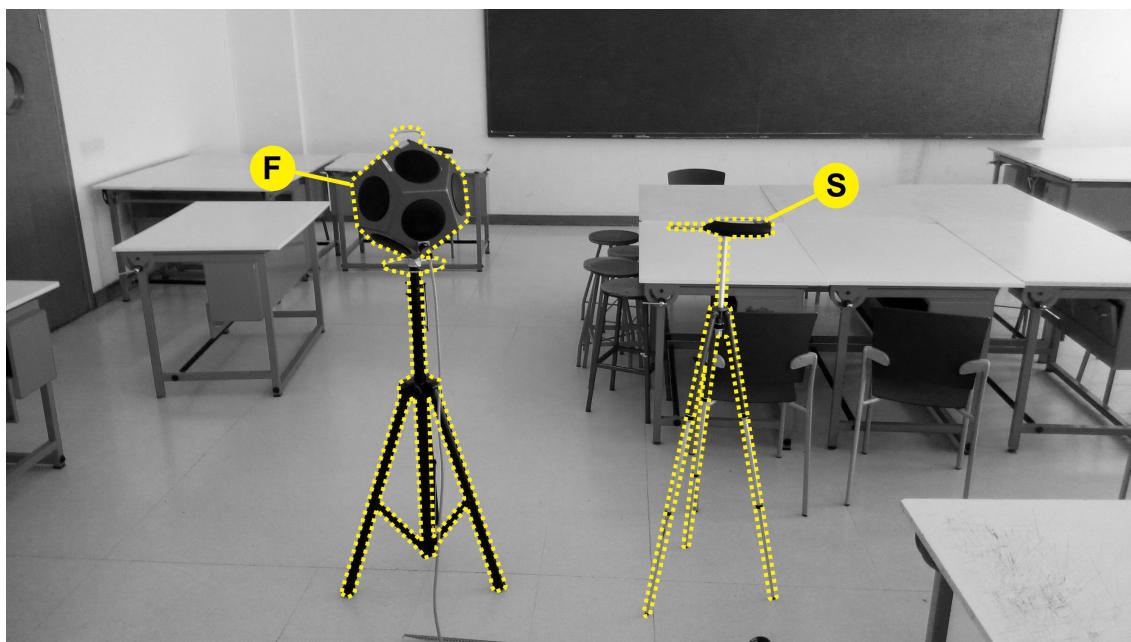


Fig. B.6: Ensayo en el aula, recinto emisor. Verificación del resultado de la ecualización de la señal aleatoria generada por la fuente. **F:** fuente dodecaédrica. **S:** sonómetro analizador.

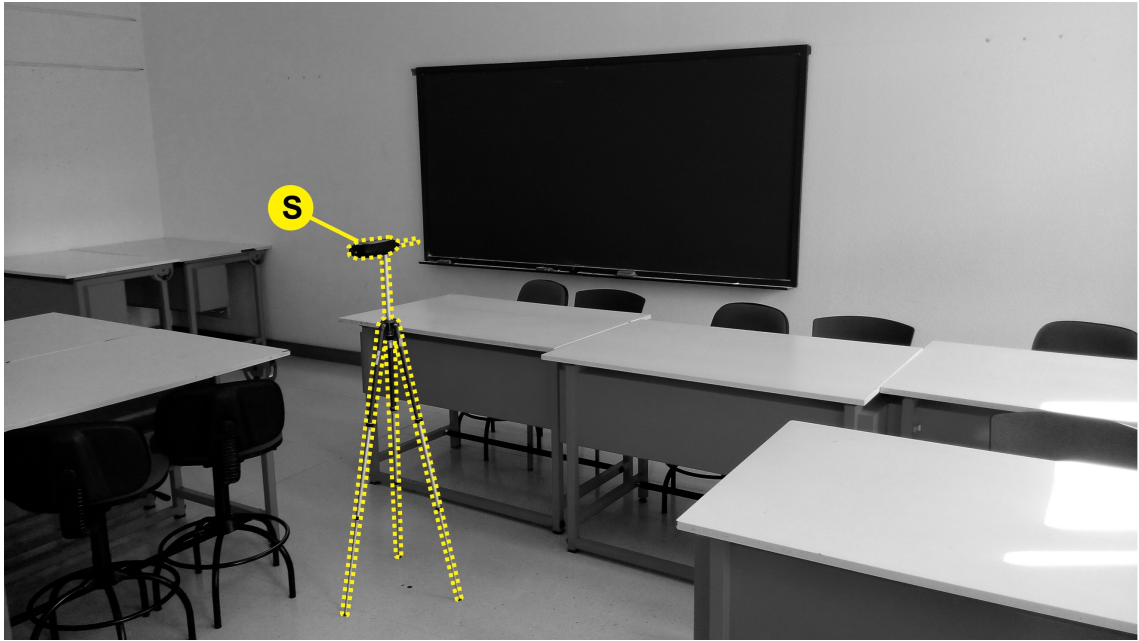


Fig. B.7: *Ensayo del cerramiento entre aulas, recinto receptor. Método clásico ISO 16283-1. S: sonómetro analizador.*



Fig. B.8: *Aula, recinto emisor.*

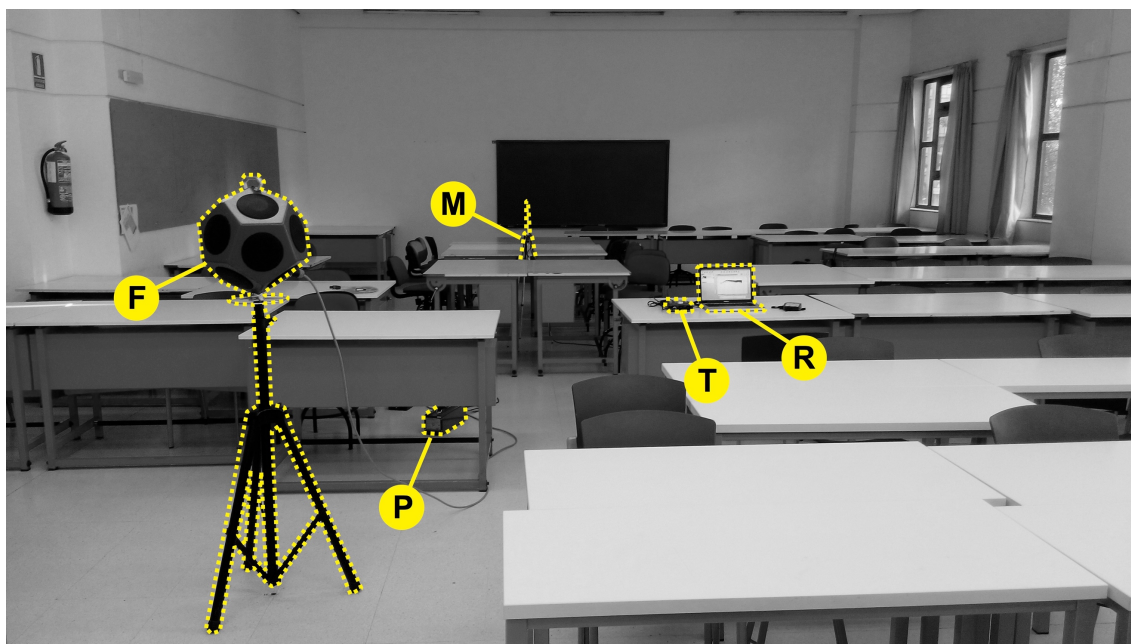


Fig. B.9: *Ensayo en el aula, medición del TR en el recinto receptor. Método de la función de transferencia.*
F: fuente dodecaédrica. **P:** amplificador digital. **M:** micrófono de condensador. **T:** interfaz de audio.
R: portátil con el software REW.

B.3 Imágenes del Departamento de Física Aplicada

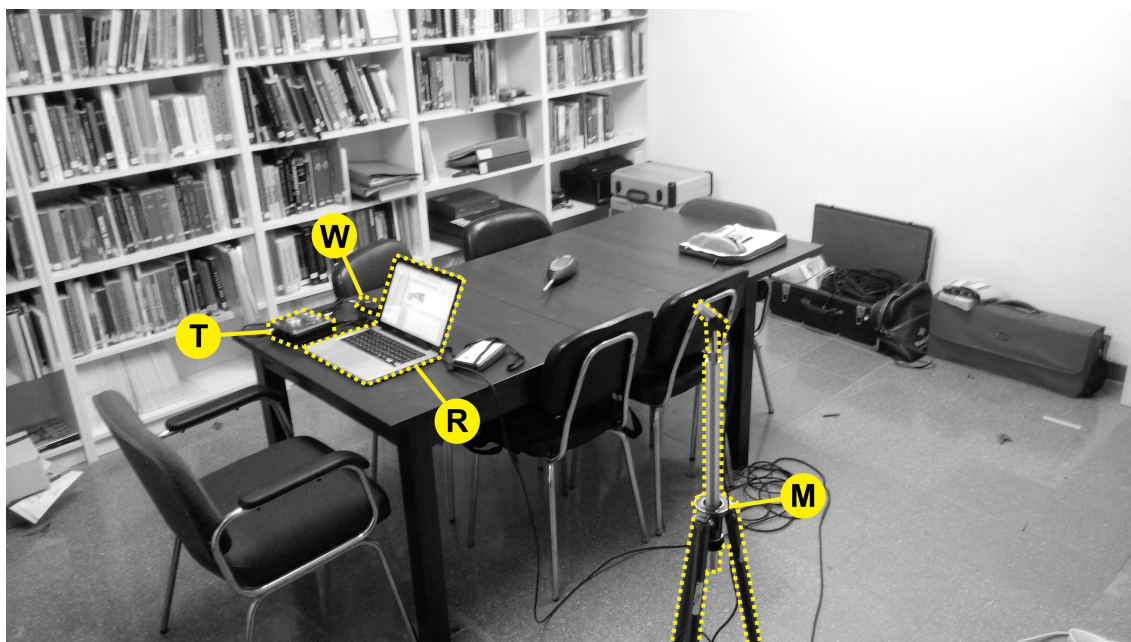


Fig. B.10: *Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto receptor. Método de la función de transferencia.* **T:** interfaz de audio. **W:** emisor UHF. **R:** portátil con el software REW. **M:** micrófono de condensador.

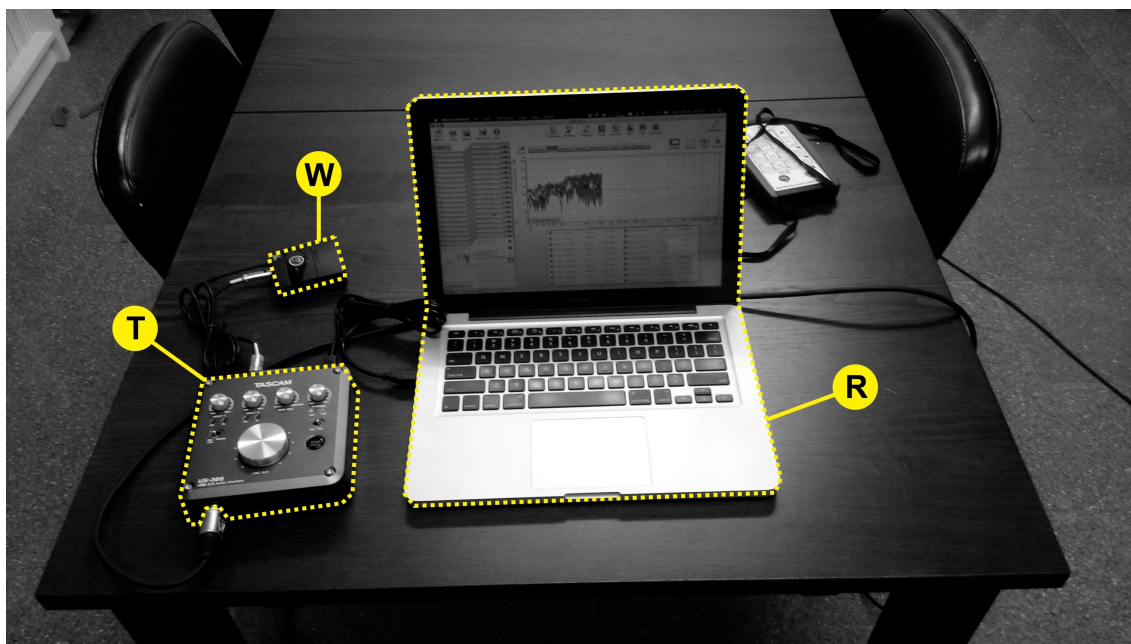


Fig. B.11: Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto receptor. Método de la función de transferencia. **T:** interfaz de audio. **W:** emisor UHF. **R:** portátil con el software REW.

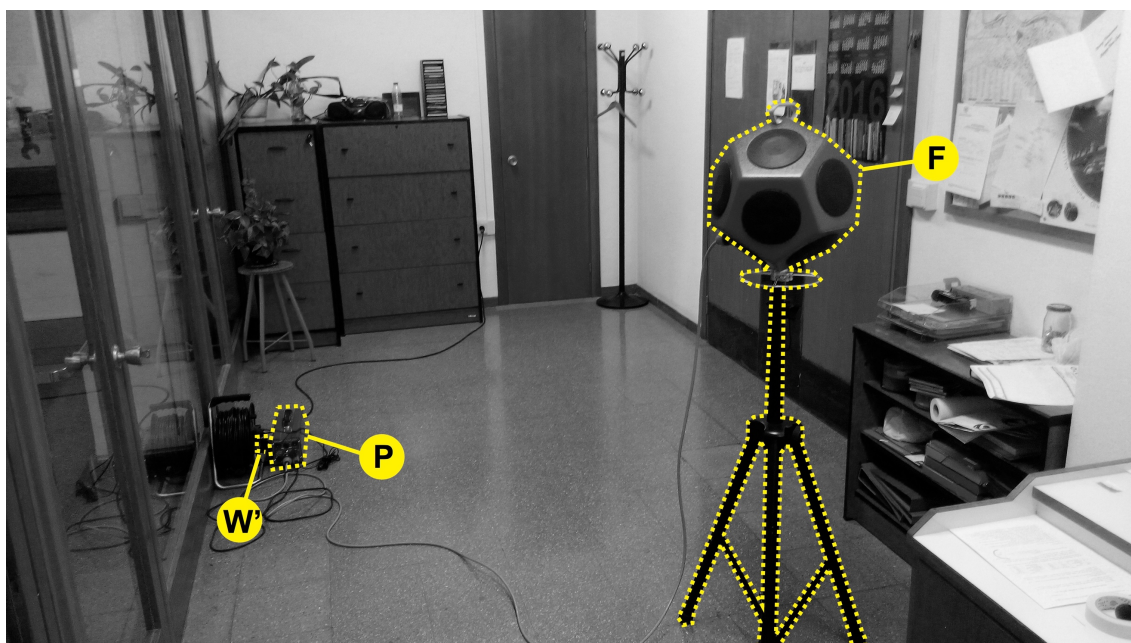


Fig. B.12: Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto emisor. Método de la función de transferencia. **W':** receptor UHF. **P:** amplificador digital. **F:** fuente dodecaédrica.

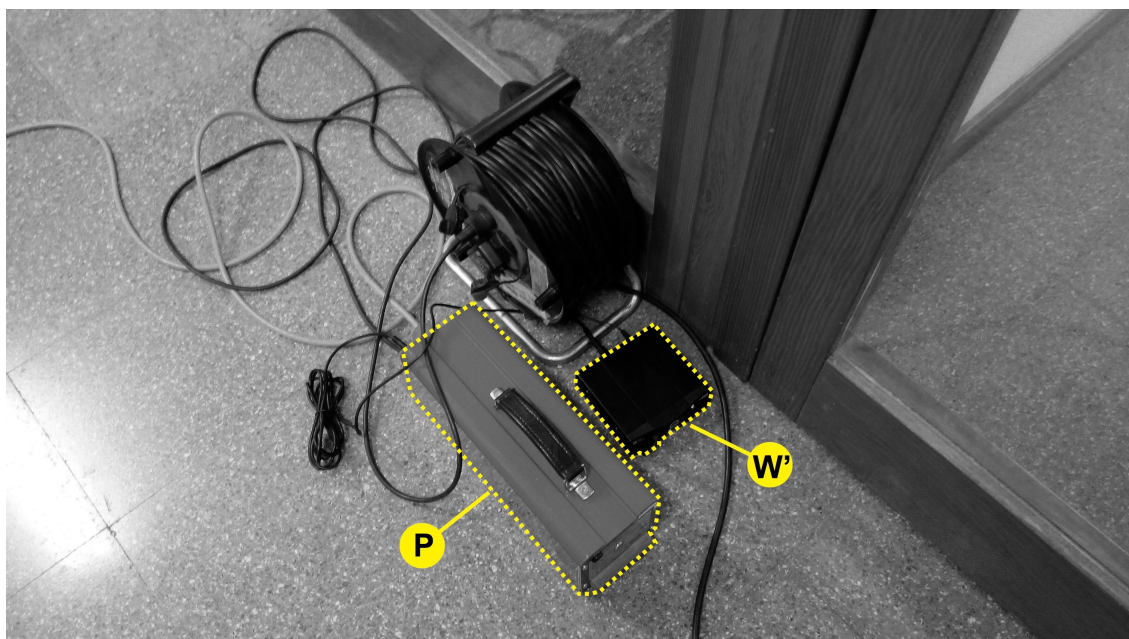


Fig. B.13: Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto emisor. Método de la función de transferencia. **P:** amplificador digital. **W':** receptor UHF.

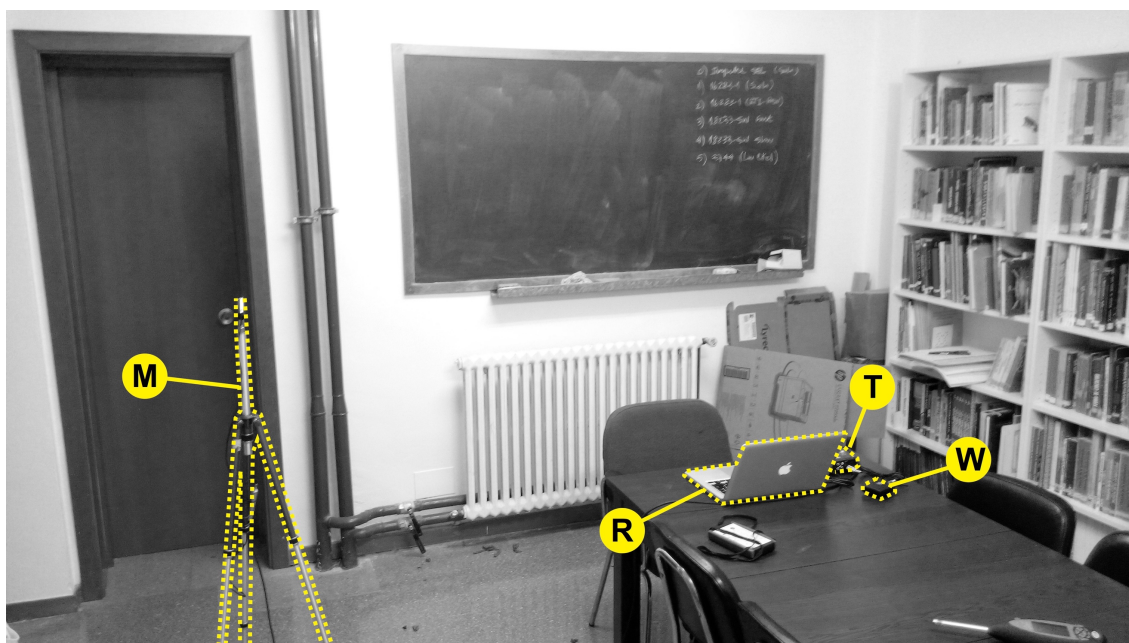


Fig. B.14: Ensayo del cerramiento entre la zona común y biblioteca del Departamento de Física Aplicada, recinto receptor. Método de la función de transferencia. **M:** micrófono de condensador. **R:** portátil con el software REW. **T:** interfaz de audio. **W:** emisor UHF.

ANEXO C: ERRORES ASOCIADOS A LA MEDIDA DEL TR

Una de las principales discusiones sobre el método de medición del tiempo de reverberación se refiere a la incertidumbre asociada a la medida a bajas frecuencias, puesto que la densidad modal en estas bandas de frecuencia es baja en recintos de pequeño volumen. En estos casos, el cálculo de la incertidumbre es más complejo, ya que en situaciones prácticas de medición se toma un número reducido de medidas – como mínimo seis, según la norma ISO 3382.^[45]

Además de la dispersión que se debe a las diferencias de excitación que resultan de la aleatoriedad de la señal utilizada, también se deben considerar otros errores, como los generados por el sistema de filtrado y detección de la cadena de medida. A continuación se describen las principales fuentes de error asociadas al método de medición del tiempo de reverberación.

C.1 Ruido Propio Generado por el Filtro Paso Banda

Una distorsión en el decaimiento de energía sonora ocurre cuando la respuesta al impulso del filtro no es suficientemente menor que la respuesta al impulso medido. En el caso del método de la fuente interrumpida, la respuesta al impulso es la señal grabada a partir del momento que cesa la fuente de excitación en un recinto. Este error se acentúa en situaciones en las que se miden tiempos de reverberación muy cortos, por ejemplo, en bandas de bajas frecuencias en recintos de poco volumen, como estudios de grabación o pequeñas habitaciones.^[12]

Un filtro tiene una respuesta al impulso propia, y por lo tanto posee un tiempo de decaimiento característico. Para medir con precisión el decaimiento de una señal sonora o de vibración, en la que se aplica un filtrado paso banda, el tiempo de decaimiento del filtro debe ser menor que el tiempo de reverberación que se está midiendo. De esta manera, se garantiza que lo que se mide es el tiempo de reverberación del sistema, y no la respuesta al impulso característica del filtro.^[9]

Jacobsen y Rindel^[46] demuestran que la inversión previa de la señal de decaimiento medido del tiempo de reverberación (*reverse-filter analysis*), antes del proceso de convolución del sistema de filtrado, disminuye la influencia del error relacionado al filtro-detector. Dado que la respuesta al impulso del filtro no es simétrica (Fig. C.1), la inversión de la respuesta que se mide compensa y minimiza el error inherente al sistema de detección:

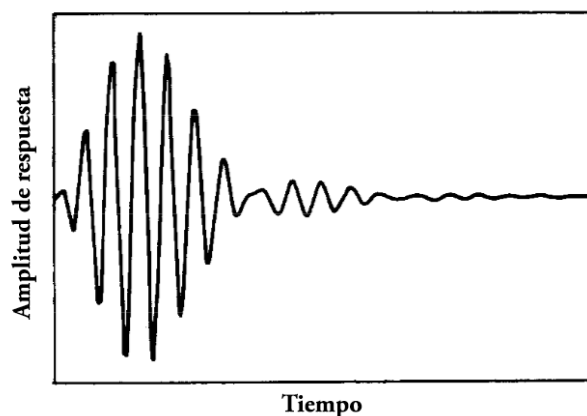


Fig. C.1: Respuesta al impulso de un filtro paso banda de tercio de octava (Brüel & Kjær 1617).^[46]

Como resultado del error generado por el ruido propio del filtro paso banda, la curva de decaimiento del nivel de presión sonora presenta un cierto número de ondulaciones. Cuando el tiempo de reverberación es muy corto, estas ondulaciones se convierten en distorsiones muy severas, que se aprecian en el decaimiento exponencial.

Para minimizar la influencia de este error en la medida del tiempo de reverberación, la norma ISO 3382 define que el producto del ancho de la banda de frecuencia que se emplea para la medición (B) por el tiempo de reverberación que se mide en esta banda (T), debe ser mayor que ocho ($BT > 8$)^[21]. El ancho de banda B se puede estimar utilizando la frecuencia central de la banda f , donde $B \approx 0.23f$ para bandas de tercio de octava, y $B \approx 0.707f$ para bandas de octava.

Ensayos experimentales en viviendas^[12] demuestran que es difícil cumplir este requisito en bandas de tercio de octava en frecuencias por debajo de los 100 Hz, y en recintos con volumen inferior a 50 m³. En situaciones en las que no se puede cumplir con este criterio, incluso utilizando el rango mínimo de T_{10} , se debe medir la banda de octava de 63 Hz para caracterizar las bandas de tercio de octava de 50, 63 y 80 Hz, lo que resulta en una curva que agrega un mayor número de modos propios con un ancho de banda más largo. De hecho, la norma ISO 16283-1 establece *a priori* que el tiempo de reverberación a bajas frecuencias se debe medir en la banda de octava de 63 Hz, en recintos en los que se aplica la medición del L_{LF} , ya que difícilmente el criterio del producto $BT > 8$ se cumpliría para las bandas de tercio de octava. De esta manera, se agrupa un mayor número de modos propios a bajas frecuencias en un filtro de octava de 63 Hz, y se atribuye el resultado a las bandas de tercio de octava correspondientes (50, 63 y 80 Hz).

La gráfica de la Fig. C.2 representa la influencia del ancho de banda en el decaimiento del nivel de presión sonora, según el criterio BT . Cuando $BT > 16$, el intervalo principal de la curva de decaimiento es una pendiente con una pequeña curvatura en los primeros 5 dB de decrecimiento. Sin embargo, este intervalo inicial se descarta en el cálculo del TR , en función de la influencia del campo directo generado por la fuente sonora.

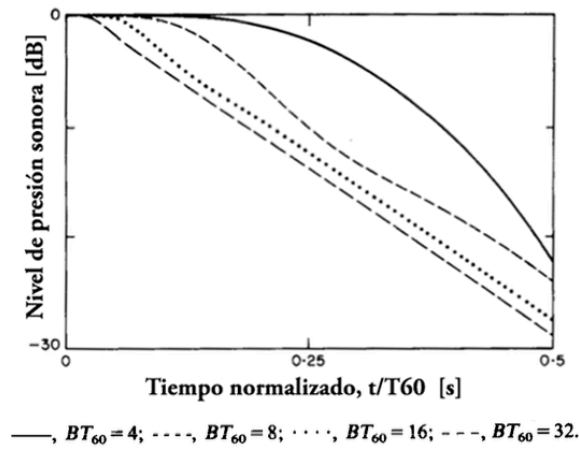


Fig. C.2: Influencia del ancho de banda B en el decaimiento del nivel de presión sonora. ^[24]

Para tiempos de reverberación igual o menores a 0,35 s, el requisito $BT > 8$ generalmente se satisface entre bandas de tercio de octava entre 100 Hz y 5000 Hz. Los eventuales errores en este rango de frecuencias se pueden corregir al invertir la señal de respuesta del sistema (*reverse-filter analysis*). Con esta técnica sería posible relajar el criterio de $BT > 8$ a $BT > 4$ ^[9,46]. La Fig. C.3 ejemplifica el efecto de la inversión de la señal de respuesta en la curva de decaimiento de una medición de tiempo de reverberación en función del criterio BT .

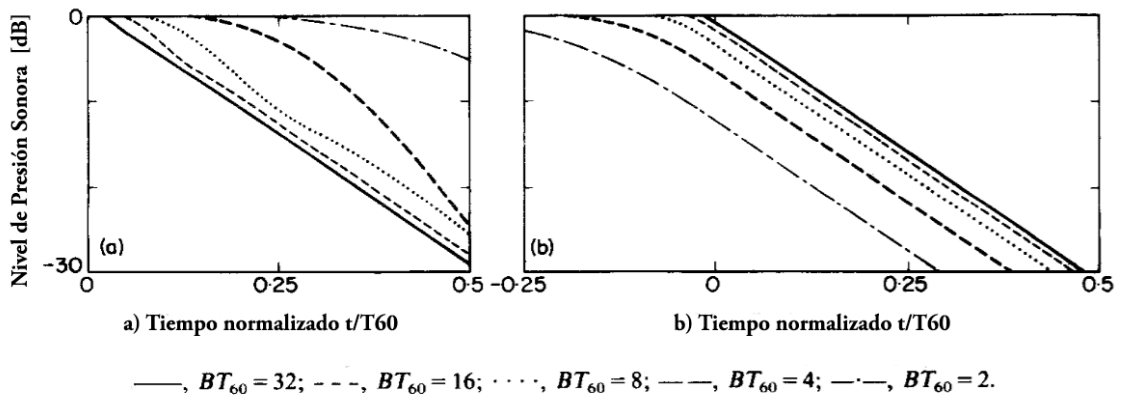


Fig. C.3: Influencia del ancho de banda del filtro en el decaimiento: a) técnica de procesamiento estándar; b) técnica de inversión de la respuesta impulsiva (*reverse-filter analysis*). ^[46]

C.2 Error por Distorsión de Fase

Otro error en la medida del TR puede ocurrir en un filtrado de bandas de frecuencia, y resulta de la no linealidad de fase de los filtros en la estimación del tiempo de reverberación. El efecto de la distorsión de fase depende de: 1) la posición de las frecuencias resonantes en relación a la frecuencia central de la banda, y 2) de la cantidad de modos existentes en la banda de frecuencia. La fase no lineal de los filtros puede introducir diferentes desplazamientos temporales para cada frecuencia que compone la banda, cambiando así la envolvente temporal de la señal y distorsionando la pendiente del decaimiento del sonido.

Un análisis comparativo de la generación de este error en la implementación de diferentes filtros (FIR, IIR y *all-pass*), y su influencia en las mediciones de tiempo de reverberación, se detalla en el estudio realizado por Sobreira-Seoane et al.^[47]. Se demuestra que el error debido a la magnitud de la respuesta de los filtros en relación a la respuesta impulsiva del sistema que se mide – analizado en el apartado 3.2.5.1 – podría ser minimizado por el error debido a la distorsión de fase, lo que induce a los autores a concluir que la utilización del filtro IIR (*Infinite Impulse Response*) invertido en el tiempo es recomendable para mediciones de TR cuando se dispone de pocos modos propios en una banda de frecuencia (tiempos de reverberación cortos), o incluso en bandas de frecuencia con tiempos de reverberación más prolongados.

ANEXO D: TR MEDIDO CON DIFERENTES SEÑALES SONORAS

Uno de los ensayos que se han llevado a cabo en el estudio experimental, y que no se analiza con detenimiento en esta memoria debido al enfoque del trabajo, es el del tiempo de reverberación del recinto receptor del caso de estudio 3 (aulas) medido con el método de la función de transferencia (método de Schroeder) y diferentes tipos de fuente de excitación de la sala: barrido sinusoidal, explosiones de globos y disparos de pistola.

Se utiliza el *software* REW para medir el tiempo de reverberación con un barrido *sweep* exponencial, y la aplicación por defecto del sonómetro integrador SOLO, que se describen en el capítulo 6, relacionado con la instrumentación utilizada en este trabajo. Se utiliza el muestreo de mediciones mínimo exigido por la ISO 3382-2, en los puntos de excitación (F1-F3) y medición (1-3) que se indican en la Fig. D.1:

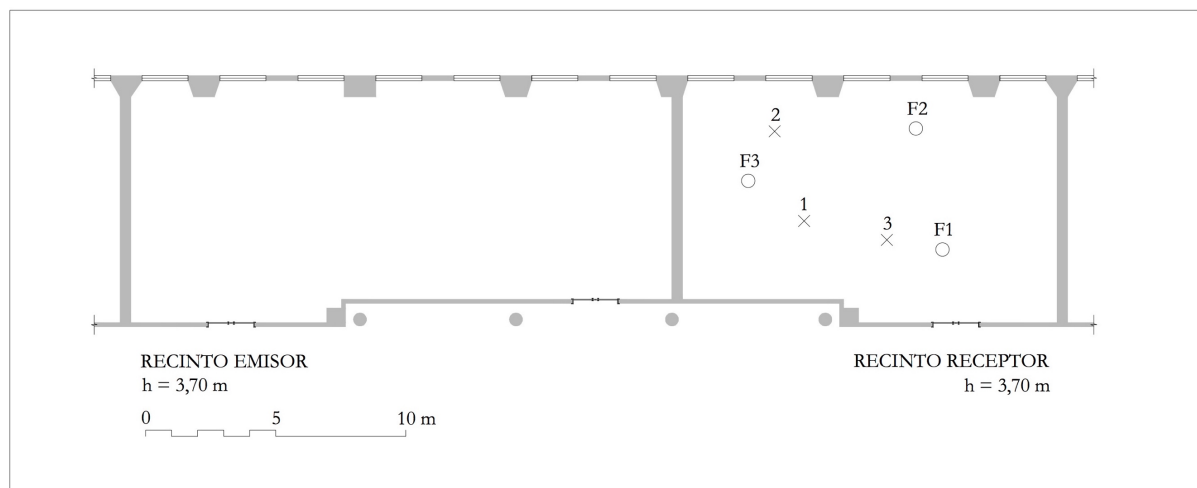


Fig. D.1: Aulas. Puntos de excitación F1-3 y medición 1-3, en el recinto receptor.

D.1 Valores Promedio de los Métodos de Medición

A continuación se presentan los resultados de las mediciones de cada método de medida:

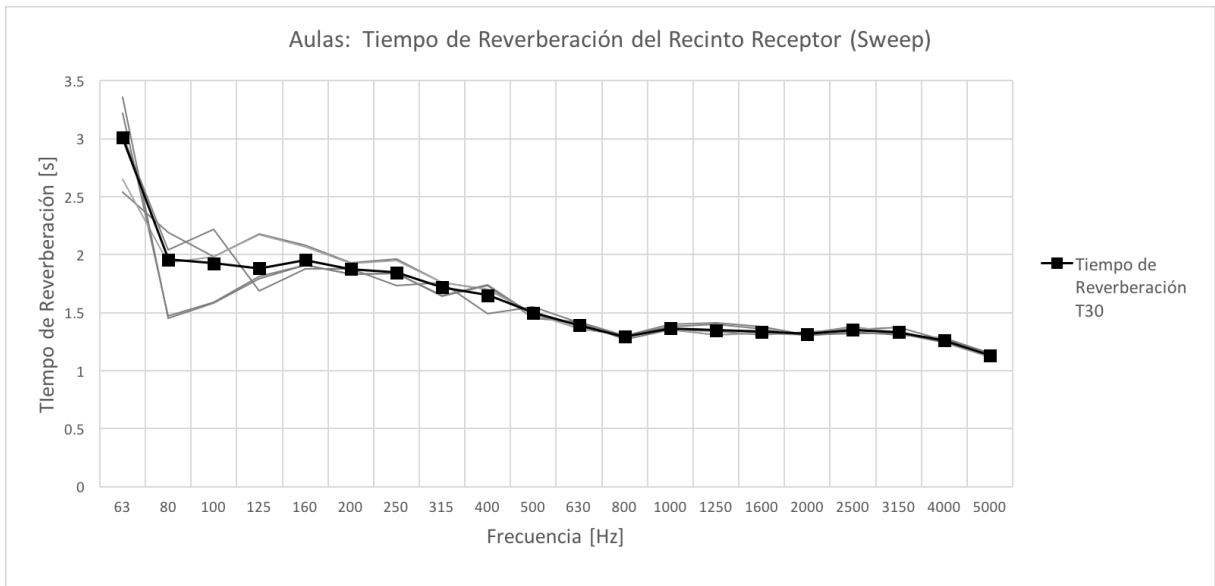


Fig. D.2: Aulas. Tiempo de reverberación en el recinto receptor. Método de Schroeder: barrido sinusoidal. Medición realizada con el software REW.

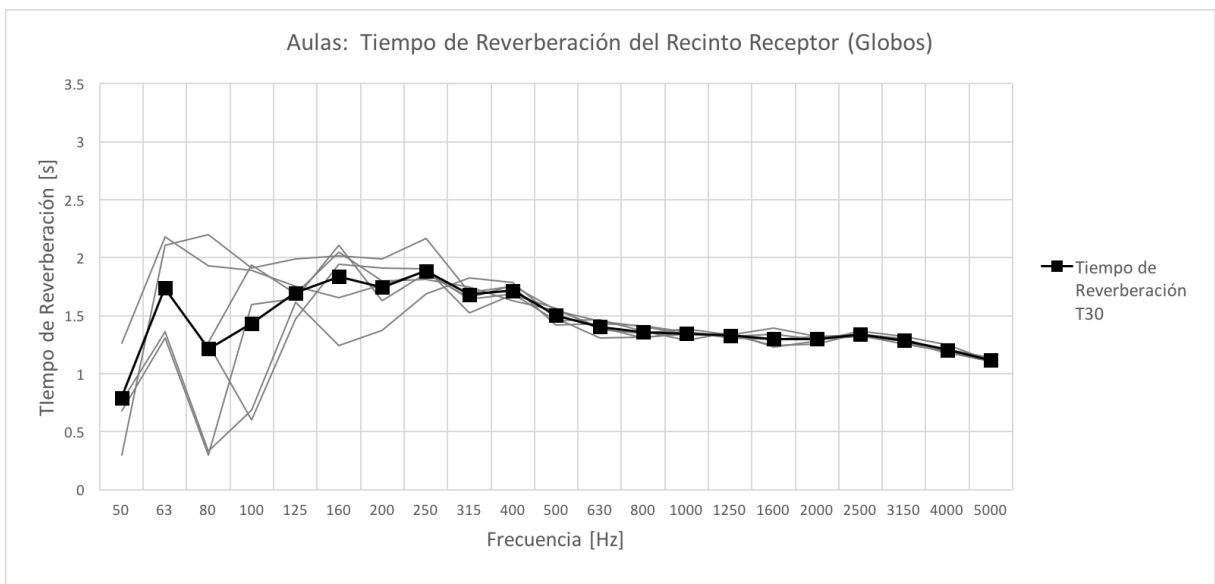


Fig. D.3: Aulas. Tiempo de reverberación en el recinto receptor. Método de Schroeder: explosión de globos. Medición realizada con el sonómetro analizador Solo Black 01dB.

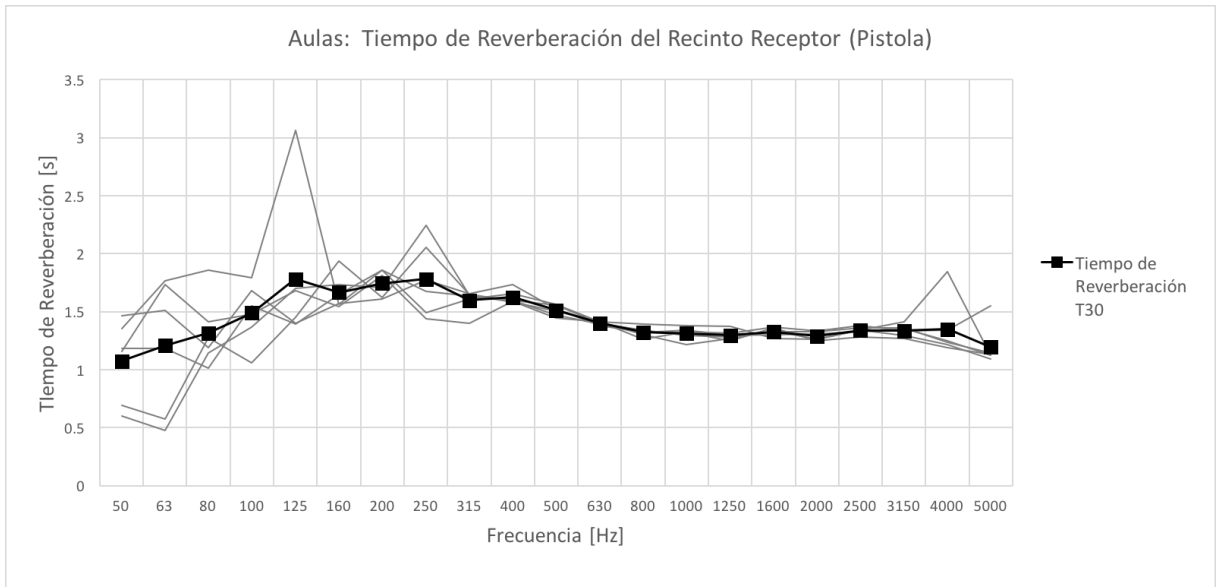


Fig. D.4: Aulas. Tiempo de reverberación en el recinto receptor. Método de Schroeder: disparo de pistola de fogeo. Medición realizada con el sonómetro analizador Solo Black 01dB.

D.2 Comparación entre Resultados

La Fig. D.5 compara las tres mediciones del tiempo de reverberación con el T30. Se observa una coherencia de los tres resultados por encima de la bandas de 100 Hz:

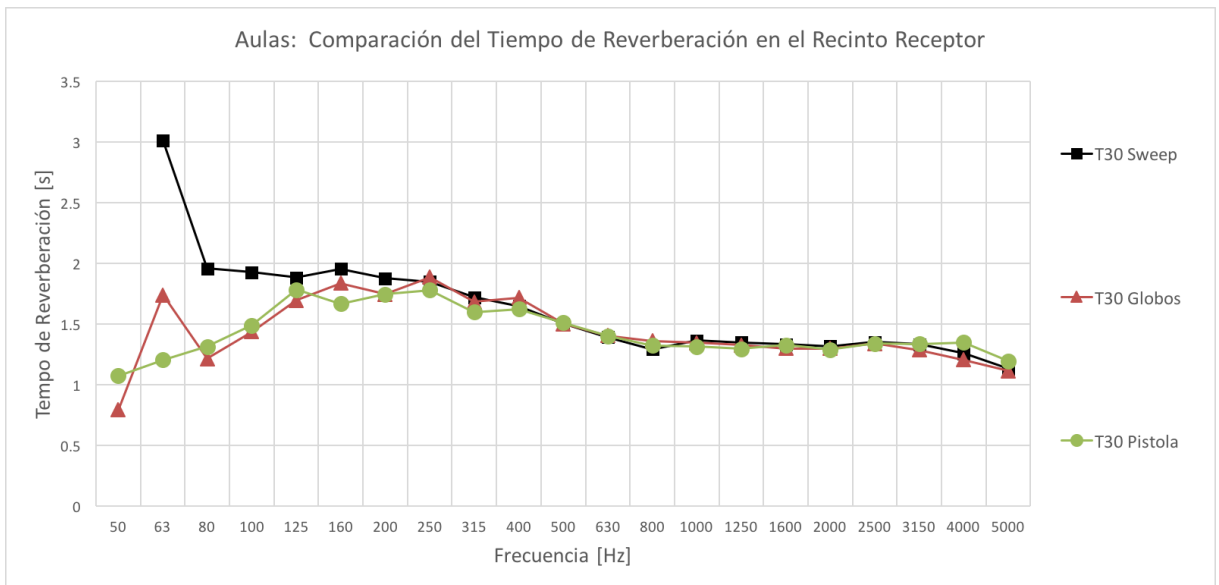


Fig. D.5: Aulas. Tiempo de reverberación en el recinto receptor. Comparación de los resultados obtenidos a través del método de Schroeder (T30), a partir de diferentes tipos de fuente de excitación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Venegas RC, Undurraga JL, Vergara MC. Evaluación in situ de aislación acústica mediante mediación de funciones de transferencia. V Congr. Iberoam. Acústica, Santiago de Chile: 2006, p. 1–10.
- [2] González A. Evaluación e implementación de una metodología para medición de aislamiento acústico entre recintos utilizando barridos frecuenciales. *Son Y Acústica Univ Tecnológica Chile* Ina 2008:41–5.
- [3] Deželak F, Čurović L, Čudina M. Determination of the sound energy level of a gunshot and its applications in room acoustics. *Appl Acoust* 2016;105:99–109.
- [4] AENOR. UNE-EN ISO 18233. Acústica. Aplicación de nuevos métodos de medición en la acústica de los edificios y recintos 2006:34.
- [5] Michalski RLXN. Metodologias para medição de isolamento sonoro em campo e para expressão da incerteza de medição na avaliação do desempenho acústico de edificações. Tesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [6] Fahy F. Foundations of engineering acoustics. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2001.
- [7] Everest FA, Pohlmann KC. Master handbook of acoustics. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2009.
- [8] Crocker MJ. Handbook of noise and vibration control. 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2007.
- [9] Hopkins C. Sound insulation. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2007.
- [10] Pedersen S, Møller H, Waye KP. Indoor Measurements of Noise at Low Frequencies - Problems and Solutions. *Low Freq Noise, Vib Act Control* 2007;26:249–70.
- [11] Fuchs VH. Applied acoustics: Concepts, absorbers, and silencers for acoustical comfort and noise control. 1st ed. Berlin: Springer; 2013.
- [12] Hopkins C, Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies. *Appl Acoust* 2005;66:1339–82.
- [13] Simmons C. Uncertainty of room average sound pressure levels measured in the field according to the draft standard ISO 16283-1. *Noise Control Eng J* 2012;60:405–20.
- [14] Müller G, Möser M. Handbook of engineering acoustics. 1st ed. New York: Springer; 2013.
- [15] Osipov A, Mees P, Vermeir G. Low-frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings. *Appl Acoust* 1997;52:273–88.
- [16] Hopkins C. Sound insulation in buildings: linking theory and practice. *Société Française d'Acoustique Acoust* 2012 2012:1557–62.
- [17] Hopkins C. On the efficacy of spatial sampling using manual scanning paths to determine the spatial average sound pressure level in rooms. *J Acoust Soc Am* 2011;129:3027–34.
- [18] AENOR. UNE-EN ISO 16283-1. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción 2014:50.
- [19] Schroeder MR. New method of measuring reverberation time. *J Acoust Soc Am* 1965;37:409–12.
- [20] Hak CCJM, Wenmaekers RHC, Van Luxemburg LCJ. Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters. *Acta Acust United with Acust* 2012;98:907–15.

- [21] AENOR. UNE-EN ISO 3382-2. Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios 2008:23.
- [22] Davy JL. The variance of reverberation time measurements due to loudspeaker position variation. *J Sound Vib* 1989;132:403–9.
- [23] Kuttroff H. Room acoustics. 5th ed. London: Spon Press; 2009.
- [24] Jacobsen F. A note on acoustic decay measurements. *J Sound Vib* 1987;115:163–70.
- [25] Venegas R, Nabuco M, Massarani P. Sound insulation evaluation using transfer function measurements. *Build Acoust* 2006;13:23–31.
- [26] Massarani PM, Nabuco de Araújo MA, Venegas R. Level adjustment for multi-channel impulse response measurements in building acoustics. *Inter Noise 2005 Proc.*, Rio de Janeiro: 2005, p. 1–10.
- [27] Schroeder MR. Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses. *J Acoust Soc Am* 1979;66:497–500.
- [28] Müller S, Massarani P. Transfer-function measurement with sweeps. *J Audio Eng Soc* 2001;49:443–71.
- [29] Vigran TE. Building Acoustics. 1st ed. New York: Taylor & Francis; 2008.
- [30] Undurraga J, Uribarri M. Nuevas herramientas para la medición de parámetros acústicos utilizando sweeps. *V Congr. Iberoam. Acústica*, Santiago de Chile: 2006, p. 1–10.
- [31] Guy-Bart S, Embrechts J-J, Archambeau D. Comparison of different impulse response measurement techniques. *J Audio Eng Soc* 2002;50:249–62.
- [32] Guidorzi P, Barbaresi L, D’Orazio D, Garai M. Impulse responses measured with MLS or swept-sine signals applied to architectural acoustics: an in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters. *Energy Procedia* 2015;78:1611–6.
- [33] Prasad SD. Investigation of explosives as a sound source for field measurements of sound insulation in buildings. *Inter Noise 1998 Proc.*, Christchurch: 1998, p. 1–4.
- [34] Lamothe MJR, Bradley JS. Acoustical characteristics of guns as impulse sources. *Can Acoust* 1985;13:16–24.
- [35] Bradley JS. Auditorium acoustics measures from pistol shots. *J Acoust Soc Am* 1986;80:199–205.
- [36] Tachibana H, Yano H, Yoshihisa K. Definition and measurement of sound energy level of a transient sound source. *J Acoust Soc Japan* 1987;8:235–40.
- [37] AENOR. UNE-EN ISO 3740. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido. Guía para la utilización de la normas básicas 2001:34.
- [38] Pätynen J, Katz BFG, Lokki T. Investigations on the balloon as an impulse source. *J Acoust Soc Am* 2011;129:EL27–L33.
- [39] Aoshima N. Computer-generated pulse signal applied for sound measurement. *J Acoust Soc Am* 1981;69:1484–8.
- [40] Raes AC. A tentative method for the measurement of sound transmission losses in unfinished buildings. *J Acoust Soc Am* 1955;27:98–102.
- [41] Mulcahy J. REW: Room EQ Wizard 2016. <http://roomeqwizard.com> (accessed June 28, 2016).
- [42] Pigeon S. Frequency shaped coloured noise generator 2016. <http://mynoise.net> (accessed June 28, 2016).
- [43] Mulcahy J. Room EQ Wizard V5.1 Help 2016:198. <http://roomeqwizard.com/help> (accessed June 28, 2016).

- [44] Bureau of Indian Standards. IS 6964 identical with IEC 61260 (1995). Electroacoustics - Octave-Band and Fractional-Octave-Band Filters. 2001:30.
<https://law.resource.org/pub/in/bis/S04/is.6964.2001.pdf> (accessed September 8, 2016).
- [45] Cabo DP, Sobreira-Seoane MA, Bernárdez JRF. A bootstrap estimation of confidence levels in reverberation time measurements at low frequencies. *Euronoise 2015 Proc.*, Maastricht: 2015, p. 167–72.
- [46] Jacobsen F, Rindel JH. Time reversed decay measurements. *J Sound Vib* 1987;117:187–90.
- [47] Sobreira-Seoane MA, Pérez D, Jacobsen F. The influence of the group delay of digital filters on acoustic decay measurements. *Appl Acoust* 2012;73:877–83.

AGRADECIMIENTOS

A María Machimbarrena, profesora y coordinadora del Máster en Ingeniería Acústica y Vibraciones, por la tutoría y facilitación de la instrumentación necesaria para este trabajo de investigación.

A Daniel de la Prida, ex alumno del Máster y cotutor de este trabajo, por aclarar diferentes temas relacionados con el procesado de señal de los métodos alternativos de medición de aislamiento.

A María Machimbarrena y a Carolina Monteiro, por la colaboración en la realización de los ensayos con ruido impulsivo que se presentan en esta memoria.

A la Universidad de Valladolid y a Santander Universidades, por la concesión de la Beca Iberoamérica + Asia en el curso 2015/16 del Máster en Ingeniería Acústica y Vibraciones.

A mi familia, por el apoyo y cariño, a pesar de la distancia.